



APLICACIONES DOCENTES DE LA TECNOLOGÍA MOCAP

Airam Diana Rehués Font

Tutor: Álvaro Felipe Page Del Pozo

Cotutor: Beatriz Rey Solaz

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 9 de noviembre de 2020



Resumen

En el presente Trabajo de Final de Grado se ha llevado a cabo la puesta en funcionamiento de un método de captura de movimiento, orientado a su aplicación en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, para las asignaturas Sonido, Óptica y Movimiento, y Diseño Gráfico, del Grado en Tecnología Digital y Multimedia.

A nivel hardware, se emplea un sistema de seguimiento de movimiento basado en tecnologías inerciales, el cual registra animaciones corporales humanas que, a su vez, se representan con aplicaciones de modelado 3D. Así, se realiza una prueba de concepto de estas disciplinas, integrando la técnica desarrollada.

En esta memoria se detalla el proceso seguido para su puesta en funcionamiento, desde la introducción de los sensores escogidos como herramienta inercial y el protocolo marcado para su operatividad, hasta su integración y aplicación en la enseñanza, ámbito el cual no saca todo el partido posible a la tecnología disponible actualmente.

Finalmente, se incluye un adjunto dividido por manuales, los cuales permiten seguir paso a paso el uso de cada uno de los softwares, así como la forma de fusionarlos para observar la información de salida pertinente, tratando así de concluir las intenciones descritas en este documento.

Resum

En el present Treball de Final de Grau s'ha dut a terme la posada en funcionament d'un mètode de captura de moviment, orientat a la seua aplicació a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació, per a les assignatures So, Òptica i Moviment, i Disseny gràfic, del Grau en Tecnologia Digital i Multimèdia.

A nivell hardware, s'empra un sistema de seguiment de moviment basat en tecnologies inercials, el qual registra animacions corporals humanes que, al seu torn, es representen amb aplicacions de modelatge 3D. Així, es realitza una prova de concepte d'aquestes disciplines, integrant la tècnica desenvolupada.

En aquesta memòria es detalla el procés seguit per a la seua posada en funcionament, des de la introducció dels sensors escollits com a eina inercial i el protocol marcat per a la seua operativitat, fins a la seua integració i aplicació en l'ensenyament, àmbit el qual no treu tot el partit possible a la tecnologia disponible actualment.

Finalment, s'inclou un adjunt dividit per manuals, els quals permeten seguir pas a pas l'ús de cada un dels programaris, així com la forma de fusionar-los per observar la informació de sortida pertinent, tractant així de concloure les intencions descrites en aquest document.



Abstract

In this Final Degree Project, the implementation of a motion capture method has been carried out, oriented towards its application in the Higher Technical School of Telecommunications Engineers, for the subjects Sound, Optics and Movement, and Graphical Design, of the Degree in Digital Technology and Multimedia.

At the hardware level, a motion tracking system based on inertial technologies is used, which records human body animations that, in turn, are represented with 3D modeling applications. Thus, a proof of concept of these disciplines is completed, integrating the developed technique.

This document details the process followed to put them into operation, from the introduction of the chosen sensors as inertial tools and the protocol set for their operation, to their integration and application in teaching, field which does not take full advantage of the currently available technology.

Finally, an attachment divided in manuals is included, which allows the final user to follow step by step how to use each software, as well as how to merge them to observe the relevant output information, thus trying to conclude the intentions described in this document.



Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Revisión del campo que se aplica	7
1.2.1 MOCAP.....	7
1.2.2 Reseñas.....	8
1.2.3 Modelo articular	9
1.3 Objetivos y alcance del proyecto	10
1.4 Estructura de la memoria.....	11
Capítulo 2. Unidad de medición inercial	13
2.1 Introducción	13
2.2 Acelerómetro.....	13
2.3 Giroscopio.....	14
2.4 Magnetómetro	15
2.5 Ángulos de Euler.....	16
2.6 Cuaterniones.....	17
2.7 Ventajas e inconvenientes aplicados	17
Capítulo 3. Hardware empleado	19
3.1 Componentes.....	19
3.1.1 Rastreadores de movimiento	20
3.1.2 Estación Awinda	20
3.1.3 USB Awinda	21
3.1.4 Software MT Manager	21
3.2 Filtro Xsens Kalman.....	22
3.3 Software	22
3.3.1 Puesta en marcha.....	22
3.3.2 Información de salida	25



Capítulo 4. Resultados. Aplicación a la enseñanza.....	26
4.1 Sonido, Óptica y Movimiento	26
4.1.1 Introducción	26
4.1.2 Objetivos	27
4.1.3 Desarrollo	27
4.1.3.1 Equipamiento necesario	27
4.1.3.2 Medida de la deriva del sensor	27
4.1.3.3 Visualizar giros	29
4.1.3.4 Orden de los giros	29
4.1.3.5 Convertir secuencias de giros.....	30
4.1.3.6 Bloqueo del Cardan (Gimbal Lock)	31
4.2 Diseño gráfico	32
4.2.1 Introducción	32
4.2.2 Objetivos	32
4.2.3 Desarrollo	32
4.2.3.1 Equipamiento necesario	32
4.2.3.2 Procedimiento.....	33
Capítulo 5. Conclusiones.....	36
5.1 Conclusión.....	36
5.2 Líneas futuras	36
Anexos	38
Anexo I. MT Manager. Grabación de movimientos IMU	38
Anexo II. Comparación formatos TXT y BVH.....	39
A2.1 Hierarchy (Jerarquía).....	39
A2.2 Motion (Movimiento).....	41
A2.3 Fusión TXT y BVH.....	42
A2.4 Volcado de forma manual	43
Anexo III. Importar Xsens en Blender	48
Anexo IV. Modelado humano con esqueleto manual en Blender	51
A4.1 Modelado humano.....	52
A4.2 Añadir armadura.....	53
Anexo V. Animar un modelo específico con captura de movimiento propia	56
Bibliografía	58

Índice de figuras

Figura 1. A la izquierda, fotograma de la película de animación “El señor de los Anillos”. A la derecha, el mismo personaje creado con MOCAP [2]	6
Figura 2. A la izquierda, par de revolución. A la derecha, par esférico o rótula [23]	9
Figura 3. Modelo articular esquema [20]	9
Figura 4. Modelo articular humano [21]	10
Figura 5. Esquema de un acelerómetro [29].....	14
Figura 6. Esquema de un giroscopio [20].....	14
Figura 7. Esquema de un magnetómetro [20]	15
Figura 8. Rotaciones consecutivas de los Ángulos de Euler [33]	16
Figura 9. Bloqueo del Cardan (<i>Gimbal Lock</i>) [34]	16
Figura 10. Kit de desarrollo de MTw Awinda [25].....	19
Figura 11. Rastreadores de movimiento MTw [25]	20
Figura 12. Sistema de coordenadas predeterminado de un MTw [25].....	20
Figura 13. Estación Awinda [25]	21
Figura 14. USB Awinda [25]	21
Figura 15. Software MT Manager [25]	21
Figura 16. Paso 1 Puesta en marcha [25]	22
Figura 17. Icono para escanear todos los puertos (Sacar All Ports) MT Manager [25]	22
Figura 18. Lista de dispositivos acoplados MT Manager [25].....	22
Figura 19. Icono del menú de configuración MT Manager [25].....	23
Figura 20. Menú de configuración MT Manager [25]	23
Figura 21. Paso 5 Puesta en marcha [25]	23
Figura 22. Tasas del menú de configuración MT Manager [25].....	23
Figura 23. Paso 6 Puesta en marcha [25]	24
Figura 24. Paso 7 Puesta en marcha [25]	24
Figura 25. Icono del inicio de grabación MT Manager [25].....	24
Figura 26. Menú de exportación de la captura de MT Manager [25].....	25
Figura 27. Sensor inercial y sistema de referencia local [25]	27
Figura 28. Ejemplo de deriva en la medida de los tres ángulos	28
Figura 29. Pantalla del Xsens MT Manager, durante un giro negativo alrededor de X.....	29
Figura 30. Efecto del orden de los giros roll - yaw	30
Figura 31. Bloqueo del Cardan cuando el giro en Y es de 90° (para la secuencia XYZ, como la del sensor Xsens). Cambios muy pequeños en la orientación del sensor, provocan oscilaciones de decenas de grados en X y Z.....	31
Figura 32. Fichero Excel con columnas correspondientes a hombro, codo y muñeca.....	34



Figura A1. 1 Colocación de los sensores Xsens en el brazo [25].....	38
Figura A2. 1 Estructura de la jerarquía del formato BVH	39
Figura A2. 2 Diagrama resumen de la jerarquía del esqueleto definido en este fichero BVH....	40
Figura A2. 3 Esqueleto definido en el fichero BVH, importado en Blender	41
Figura A2. 4 Estructura del movimiento del formato BVH	41
Figura A2. 5 Ejemplo de muestra de la parte Motion del esqueleto de la Figura A2.3	42
Figura A2. 6 Ejemplo del fichero TXT capturado por los sensores de movimiento.....	42
Figura A2. 7 Orden que establece el código de jerarquía, seguido por los frames en la sección de movimiento	43
Figura A2. 8 Ejemplo de la sección de movimiento de un fichero BVH, con los datos capturados de los sensores del TXT	43
Figura A2. 9 Paso 1 Reemplazamiento puntos por comas en fichero TXT	44
Figura A2. 10 Paso 2 Resultado de copiar los valores TXT en una hoja de Excel	44
Figura A2. 11 Paso 3 Aplicación fórmula para unir los valores de tres columnas en una, con un espacio de separación.....	44
Figura A2. 12 Paso 3 Resultado de aplicar la fórmula y arrastrar hacia el resto de valores	45
Figura A2. 13 Paso 4 Resultado de la unión de las columnas de valores en el Excel adjuntado	46
Figura A2. 14 Paso 5 Pegado personalizado de los valores unidos del TXT en el Excel	46
Figura A2. 15 Paso 6 Excel adjunto con valores capturados de los sensores	46
Figura A2. 16 Paso 7 Fichero BVH adjunto con los valores procesados en Excel.....	47
Figura A3. 1 Paso 1 Importar el fichero BVH	48
Figura A3. 2 Paso 2 Seleccionar el fichero BVH.....	48
Figura A3. 3 Paso 3 Ventana obtenida al importar el archivo BVH	49
Figura A3. 4 Paso 4 Línea de tiempo y menú de reproducción	49
Figura A3. 5 Cambiar fps para la animación en Blender	49
Figura A3. 6 Frames capturados durante la reproducción de la animación capturada con los sensores Xsens	50
Figura A4. 1 Ventana principal web software Blender	51
Figura A4. 2 Ventana de inicio Blender.....	51
Figura A4. 3 Modelo humano descargado de Free3D.....	52
Figura A4. 4 Paso 1 Importar Modelo (.obj).....	52
Figura A4. 5 Paso 2 Seleccionar StickfigureBODY.OBJ	53
Figura A4. 6 Paso 3 Herramientas para la visión del modelo	53
Figura A4. 7 Paso 1 Añadir armadura.....	53
Figura A4. 8 Paso 2 Modo de visualización de la armadura.....	54



Figura A4. 9 Paso 3 Herramientas para la edición de la armadura	54
Figura A4. 10 Paso 4 Vista general y lateral armadura.....	54
Figura A4. 11 Paso 4 Vista detalle mano y pie armadura	55
Figura A4. 12 Paso 5 Opción X-Axis Mirror	55
Figura A5. 1 Habilitar la opción Names del menú derecho	56
Figura A5. 2 Menú para añadir restricciones a los segmentos	56
Figura A5. 3 Resultado final de animar el modelo propio con una captura específica	57

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Las técnicas de captura de movimientos (MOCAP) han experimentado un gran avance en los últimos 20 años, saliendo del ámbito de la investigación sobre el estudio de movimientos humanos (en el deporte, la ergonomía o la rehabilitación), para entrar de lleno en la industria del cine y de los videojuegos. En el mundo del cine, por ejemplo, esta técnica pretende representar entornos y personajes ficticios de la forma más realista y precisa posible del realismo y la imitación. A pesar de que estudios cinematográficos como Pixar prefieren evitarla, ya que lo consideran un engaño para la animación, se ha convertido en una herramienta fundamental en la creación de personajes animados en 3D para películas como “Piratas del Caribe” (2003), “The polar Express” (2004), “The incredible Hulk” (2008) o “Avatar” (2009) [2].



Figura 1. A la izquierda, fotograma de la película de animación “El señor de los Anillos”. A la derecha, el mismo personaje creado con MOCAP [2]

De igual forma y con las mismas intenciones, se aplica en la producción de videojuegos, dotando a los personajes o elementos que lo componen de gran autenticidad realista, o facilitando la interacción con el propio juego.

Los dispositivos móviles también hacen uso de esta tecnología para obtener la ubicación y la posición de la pantalla, a los deportistas les complementa en el estudio y análisis de su condición física y optimización de su rendimiento, y respecto a la medicina, aporta información sobre el estado físico humano, facilitando análisis ortopédicos o procesos de rehabilitación [2, 3, 4 y 5].

La mayoría de las aplicaciones en el campo del cine, la producción de dibujos animados o los juegos por ordenador utilizan la tecnología basada en sistemas ópticos, que capturan y reproducen el movimiento mediante sistemas de videofotogrametría y visión artificial. Sin embargo, recientemente se está extendiendo el uso de sistemas inerciales, cuyos sensores (denominados IMUs, *Inertial Measurement Unit*) permiten registrar el movimiento en tiempo real y a un coste mucho menor que los complejos y caros sistemas de videofotogrametría [1].

Estos sensores se empezaron a utilizar hace mucho tiempo en el ámbito de la navegación aérea y el control de satélites. Sin embargo, la necesidad de incorporar sensores de orientación en los teléfonos móviles ha provocado un enorme desarrollo tecnológico, permitiendo la creación de nuevos dispositivos electrónicos basados en MEMS (Sistemas MicroElectroMecánicos), de reducido coste y tamaño. En pocos años han ido evolucionando respecto a su tamaño, fiabilidad, precisión y calidad-precio.



Los IMUs registran en tiempo real información sobre la aceleración, orientación respecto de la vertical, velocidad angular y orientación respecto del campo magnético terrestre local, mediante los acelerómetros, giroscopios y magnetómetros que incorporan. Una vez estos valores son computados y procesados, mediante algoritmos de fusión de datos, este instrumento estima la orientación respecto de una referencia del objeto al cual está adherido y se pretende estudiar [1]. Fijando varios de ellos a segmentos corporales, es posible animar modelos articulares del cuerpo humano, obteniendo una representación completamente realista del movimiento.

Sin embargo, a pesar de su gran desarrollo y de los numerosos campos en los que se aplica, su implementación en el ámbito docente es muy limitada, y se reduce a asignaturas específicas de análisis de movimientos humanos, en titulaciones relacionadas con la Biomecánica, como el Grado en Ingeniería Biomédica. En otras materias, cercanas al estudio del movimiento de cuerpos, como puede ser la Ingeniería Mecánica, o la Robótica, no se utilizan estas técnicas, a pesar de las posibilidades que ofrece. En disciplinas básicas tradicionales, como la Física Aplicada, donde la medida del movimiento y su representación forma parte de todos los programas docentes, el uso de sensores inerciales es escaso, y se limita a utilizar el acelerómetro de un smartphone en experimentos caseros de movimiento unidimensional.

Por otra parte, la aparición de nuevas titulaciones donde la captura y/o análisis de movimientos humanos es parte fundamental de la formación específica, abre un notable campo para el desarrollo de experiencias docentes basadas en la captura en tiempo real mediante IMUs. Este es el caso del Grado en Tecnologías Digital y Multimedia, donde la captura de movimientos con IMUs no sólo puede ser una gran ayuda para materias relacionadas con la animación, sino que servirán de apoyo en otras relacionadas con las bases teóricas del MOCAP, como la de Sonido, Óptica y Movimiento. El uso de sistemas de representación y análisis del movimiento permitirá a los alumnos visualizar los conceptos en tiempo real, significando un gran avance frente a las explicaciones más o menos teóricas que se usan en la actualidad.

1.2 Revisión del campo que se aplica

1.2.1 MOCAP

El análisis de movimientos humanos es una parte fundamental en el desarrollo de las ciencias biomédicas, del deporte y animación 3D. Las tecnologías que engloban este campo se dividen en ópticas, inerciales y magnéticas. Sin embargo, la búsqueda de estos estudios demuestra la escasa participación e interés en el desarrollo docente [6].

La técnica para la captura de movimiento se fundamenta en un hardware determinado y un software para el procesamiento de datos. El término MOCAP (Captura de Movimiento, o *Motion Capture*, en inglés) hace referencia a los métodos de grabación de movimiento del cuerpo humano, con su posterior representación digital. Los sensores con los que esta tecnología cuenta contienen diferentes principios físicos: rastreadores ópticos a través de cámaras 2D/3D, imanes permanentes y receptores de bobina formando sensores magnéticos, controladores de ángulos de articulación con esqueletos mecánicos, o acelerómetros y giróscopos que componen los sensores inerciales [6].

1.2.2 Reseñas

Se han publicado diferentes trabajos de revisión sobre las bases científicas y técnicas, el estudio del MOCAP en general, y de los IMUs en particular [7].

Las aplicaciones más habituales de la monitorización corporal, basada en sensores inalámbricos, se centran en el análisis de la seguridad, el bienestar y la salud, logrando su integración en sistemas, estimulado por el afán de los médicos e investigadores. El monitoreo remoto de los pacientes establece modelos de negocios que cubren los costos e identifican los beneficios de esta tecnología, mejorando a su vez la calidad de atención a aquellos afectados por enfermedades crónicas [8 y 9].

Las redes de sensores corporales han surgido como una tecnología revolucionaria en el mantenimiento de la vitalidad, el fitness y las ciudades inteligentes, entre otros. Pese a que los sistemas actuales del mercado permiten que un solo dispositivo monitoree una gran cantidad de información del usuario, la fusión de datos también cuenta con determinados inconvenientes que afectan a las opciones de diseño en diferentes niveles. Este análisis biomecánico se puede llevar a cabo en entornos menos restringidos, pero todavía contiene desafíos técnicos, como la deriva en la medición, las interferencias externas o las propiedades no lineales de los sensores, que influyen en la precisión y validez de los sistemas de medición existentes, además de la complejidad según el tipo de algoritmos que requiere cada aplicación [10, 11 y 12].

Hace décadas, la información sobre la movilidad utilizaba tecnología compleja que sólo se usaba en aplicaciones militares o en el ámbito de la robótica. Actualmente, existe una gran cantidad de literatura focalizada en los sistemas “*Pedestrian Dead Reckoning*” (PDR), capaces de detectar y caracterizar los pasos humanos. Así pues, entre los productos pioneros que plasman esta ciencia, se encuentran “*Samsung Galaxy Gear*” y “*Google Glass*”. Estos sistemas ofrecen un buen seguimiento a corto y medio plazo en determinadas circunstancias, pero también aportan errores de control influenciados por la variación de campos magnéticos [13, 14, 15 y 16].

Las unidades de detección de sensores inerciales también son aplicadas tanto en Ingeniería Biomédica y Robótica, como en realidad virtual, donde se permite la captura de movimiento en tiempo real de los segmentos corporales [16]. Son muchos los procesos que hay que completar para obtener los resultados que se observan en videojuegos como “*God of War*”, para PS4, “*Metal Gear Solid*”, “*Final Fantasy VIII*”, “*Batman Arkham Origins*”, o el famoso “*Call of Duty*” [17 y 18].

De la misma forma, los éxitos que recoge esta técnica digital también se demuestran en películas como “*Star Wars*”, “*El Hobbit*”, “*Avatar*”, “*Ted*”, “*Piratas del Caribe*”, “*Vengadores*”, “*Polar Express*” o “*Monster House*” [19].

Sin embargo, esta revisión bibliográfica en el campo de sensores inerciales, demuestra la laguna de conocimiento que hay en el ámbito de la enseñanza. Este hecho justifica la oportunidad de dicho proyecto y la adaptación de una técnica centrada en dos niveles para los alumnos, que se expondrá en capítulos posteriores, ya que existen infinidad de aplicaciones de los IMUs, sobretodo en el campo de la medicina, pero su uso es casi nulo en el ámbito docente.

1.2.3 Modelo articular

Para llevar a cabo el rastreo de un cuerpo humano mediante un sensor, es imprescindible tener en cuenta las restricciones de las articulaciones, mediante enlaces o ligaduras. Un IMU únicamente mide ángulos, por tanto, para obtener una representación del cuerpo que será animado, se necesita un modelo que funcione sólo con ángulos.

Los grados de libertad [26] se ven reducidos por estos enlaces sobre el movimiento humano, ya que los componentes del tronco superior e inferior de una persona tienen una forma establecida para llevar a cabo las actividades, determinada por las articulaciones [20].

En los modelos articulados del cuerpo humano, estos enlaces se llevan a cabo mediante articulaciones, como pares de revolución o rótulas (Figura 2). Los primeros podrían relacionar el movimiento del codo o la rodilla, determinando la posición mediante un ángulo, y los segundos, corresponden con el resto de articulaciones, contando con 3 posibles giros para representar la postura, como se puede observar en el esquema de la Figura 3 [20 y 21].

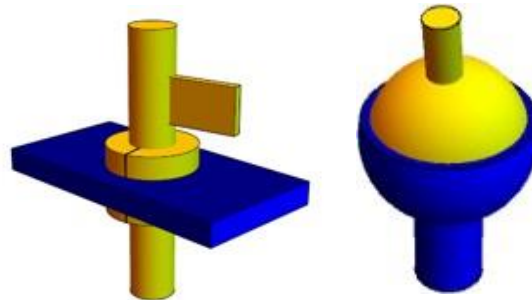


Figura 2. A la izquierda, par de revolución. A la derecha, par esférico o rótula [23]

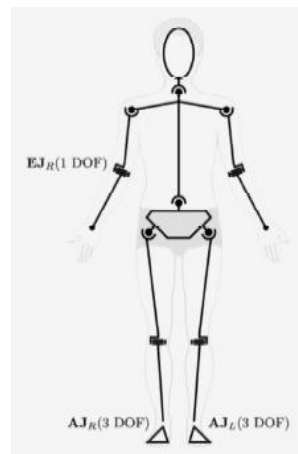


Figura 3. Modelo articular esquema [20]

Estos patrones son los utilizados por los IMUs para realizar las capturas de movimientos humanos (Figura 4), ya que, a pesar de que la complejidad del cuerpo humano es mucho más elevada, una correcta representación sobre la coordinación de los fragmentos corporales puede aportar un movimiento corporal bastante realista [20 y 23].

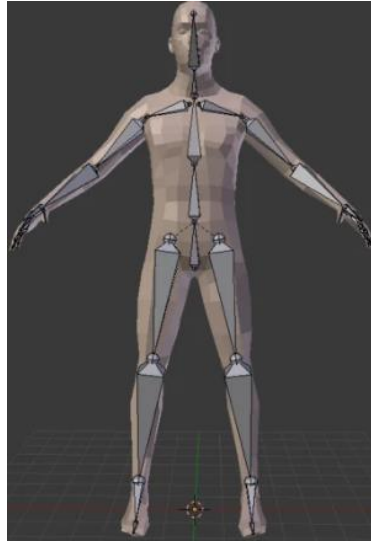


Figura 4. Modelo articular humano [21]

Para la captura y representación completa del movimiento del cuerpo humano, se utilizan modelos como el mostrado en la Figura 4, donde cada segmento se posiciona mediante un sensor inercial. El movimiento de cada articulación se determina a partir del giro relativo entre los sensores de los dos segmentos conectados. Así, si se quiere obtener la actividad de un brazo, se deberá contar con tres sensores, uno en el hombro, otro en el antebrazo y otro en la parte superior de la muñeca. En el caso de la pierna, se podría colocar uno en la cadera, otro en la rodilla, y otro en la altura del tobillo, haciendo referencia al movimiento de cada una de las articulaciones [24].

1.3 Objetivos y alcance del proyecto

Como objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado se propone adaptar una técnica de captura de movimiento para su aplicación en la enseñanza, dirigida a los alumnos del Grado en Tecnología Digitales y Multimedia de la ETSIT, dividida en:

- Nivel básico dentro de la materia de Física (Sonido, Óptica y Movimiento), para que el alumnado profundice en los fundamentos físicos de este tipo de sensores, visualizando los giros en 3D y en la realidad, así como su representación en un entorno virtual.
- Nivel aplicado dentro de la materia de Diseño Gráfico, para la elaboración de un modelo articular y su posterior animación.

Para llevar a cabo este proceso, utilizando la unidad de medición inercial inalámbrica de MTw Awinda, de la marca Xsens, se deben completar los siguientes cimientos, marcados como objetivos secundarios:

- Estudiar los IMUs utilizados, el software que incorporan, y su conexión con el equipo.
- Fusionar los valores de salida con el software Blender, para demostrar la animación.

Una vez alcanzado el control, el análisis y la interpretación de los datos que recogen las unidades de medición inercial (IMU), se podrán introducir los amplios beneficios y ventajas que esta tecnología aporta en la enseñanza, y que son apenas aprovechados.



1.4 Estructura de la memoria

Esta memoria se estructura en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. Introducción.

En este capítulo introductorio se exponen, en primer lugar, los antecedentes y motivaciones que han conducido a la elaboración del presente proyecto, situándolo en un marco contextual y teórico.

A continuación, se muestra una revisión realizada sobre el MOCAP y los estudios que se han llevado a cabo para las aplicaciones de las unidades de medición inercial. Además, se hace hincapié en la importancia de los modelos articulares a la hora de realizar las capturas de movimiento corporales.

Seguidamente, en el apartado anterior al actual, se presenta una serie de objetivos que se han propuesto para completar el proyecto.

- Capítulo 2. Unidad de medición inercial.

Basado en la herramienta que se emplea en el trabajo, este segundo capítulo describe el marco teórico sobre el funcionamiento y los componentes de todo sensor inercial de movimiento (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro), las formas de representación de los valores que recoge (Ángulos de Euler y cuaterniones), así como sus ventajas y limitaciones.

- Capítulo 3. Hardware empleado.

La intención de este capítulo es describir el hardware empleado. En el subapartado sobre componentes, se detallan cada uno de los dispositivos de los que se disponen, y en el subapartado Filtro Xsens Kalman se pretende demostrar cómo estos materiales anteriores realizan la recogida de datos. Una vez queda expuesto el hardware, se dispone a explicar el software que lo acompaña, tanto su puesta en marcha como su información de salida.

- Capítulo 4. Resultados. Aplicación a la enseñanza.

En esta parte del trabajo se recogen las demostraciones de la evolución de los objetivos. Se exponen las dos prácticas que se propusieron alcanzar desde un principio. Cada una de ellas compuestas por diferentes puntos para introducir al alumnado en este ámbito, así como dotarle de un guion de pasos a realizar, y de ciertas pruebas para comprobar la adquisición de los conocimientos necesarios.

- Capítulo 5. Conclusión.

Como todo proyecto, en esta sección se exponen, por un lado, las conclusiones que se han obtenido en el desarrollo de todas las partes anteriores, y en comparativa con las expectativas que se tenían desde un inicio. Por otro lado, se describen las líneas futuras en las que se podría aplicar el campo tratado, así como su ampliación en la enseñanza y en las asignaturas referidas.



- Anexos.

Finalmente, para facilitar la aplicación y el funcionamiento del método de captura diseñado, principalmente para el ámbito docente, se incluyen diferentes manuales. De esta forma, se permite seguir paso a paso los procesos en los softwares empleados hasta la visualización de la animación pertinente, ya sea para la elaboración de las prácticas propuestas, o para otro uso.

El objetivo de este documento es proporcionar unas directrices generales y un manual de estilo para la realización de la Memoria del Trabajo Fin de Grado.

- Bibliografía.

Todos los documentos, investigaciones, artículos, revisiones o proyectos que se han empleado para obtener una referencia de la información que se recogía, se citan en esta sección.

Capítulo 2. Unidad de medición inercial

2.1 Introducción

El MTw™ es una unidad de medición inercial inalámbrica, de tamaño reducido, que cuenta con sensores de tipo acelerómetro 3D, giroscopio, magnetómetro y un barómetro, los cuales proporcionan información de los ejes XYZ. Un cuerpo tiene 6 grados de libertad (6 DOF – *Degrees Of Freedom*): tres giros y tres traslaciones, pero como un IMU solo puede obtener información sobre los tres giros, para obtener una orientación completa, cuenta con información redundante de siete variables; la inclinación dada por el acelerómetro, los tres giros que proporcionan el giroscopio, y los otros tres del magnetómetro [26 y 27].

El procesador que tiene incorporado se encarga, por un lado, del muestreo, almacenamiento en búfer, calibración e integración de los datos inerciales, y, por otro lado, del protocolo de red inalámbrica para la transmisión de datos [25].

Según el proveedor, la precisión del seguimiento de movimiento 3D es asegurada, incluso si los datos se desorientan temporalmente en su transmisión, haciendo un uso muy eficiente del ancho de banda limitado disponible [25].

Los numerosos campos en los que se usa engloban la biomecánica, rehabilitación, ciencias del deporte y el ejercicio, ergonomía, realidad virtual, animación y captura de movimiento, como el caso que se va a estudiar, aplicándolo en las aulas [25].

2.2 Acelerómetro

En física, la aceleración es la magnitud que cuantifica la variación de velocidad por unidad de tiempo de cierto objeto. Por consecuente, el acelerómetro será el sensor que permita medir dicho valor en la unidad inercial. En este caso, esta medida se expresa mediante fuerzas G (g), teniendo en cuenta la fuerza de la gravedad [28 y 29].

Los acelerómetros que incorporan las unidades inerciales se encuentran integrados en silicio, y usan dispositivos de tamaño minúsculo llamados MEMS (Sistemas MicroElectroMecánicos – *Microelectromechanical Systems*). Estos están formados por dos placas, y la variación de posición de una de ellas y el voltaje producido, permitirá calcular la aceleración [28].

A pesar de tratarse de unos sensores con una gran precisión en situaciones estables, el papel que desempeñan en un IMU para la captura de movimientos es secundario. Simplemente mide inclinaciones relacionadas con la dirección vertical, como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, no es capaz de captar giros alrededor del eje vertical, porque las componentes de g no varían, ni puede experimentar aceleraciones mayores a g. Así pues, sus funciones como inclinómetro aportan al giroscopio la información complementaria sobre la orientación del sensor, siendo este el elemento fundamental de medida [20 y 29].

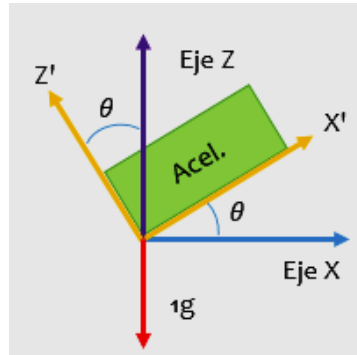


Figura 5. Esquema de un acelerómetro [29]

2.3 Giroscopio

En física, la velocidad angular es la magnitud que cuantifica la variación del ángulo girado por unidad de tiempo de cierto objeto. Por consiguiente, el giroscopio será el sensor electromecánico que, mediante la medida de la tasa de rotación, permite conocer dicho valor. Un IMU cuenta con 3 giroscopios, orientados en las 3 direcciones del espacio, para poder medir las 3 componentes de la velocidad angular [27].

Al igual que los acelerómetros, los giroscopios también hacen uso de la tecnología MEMS (Sistemas MicroElectroMecánicos – *Microelectromechanical Systems*), resultando perfectamente integrados con un tamaño reducido. Estos se basan en la fuerza de Coriolis; si una partícula de masa m se mueve con una velocidad v , en un sistema de referencia que gira con velocidad angular w , experimentará una fuerza de inercia, como se observa en la Figura 6, denominada fuerza de Coriolis. De esa forma, conociendo la velocidad, se determina la velocidad angular, y de ahí, el ángulo girado por integración [27].

Como estos sensores solo aportan datos sobre los giros, pero no obtienen las coordenadas ni las traslaciones del dispositivo, para usarlos en el ámbito de captura de movimiento y animación, resulta imprescindible asociarlos a un modelo articular, el cual se ha repasado en la sección 1.2.3 Modelo articular [24 y 27].

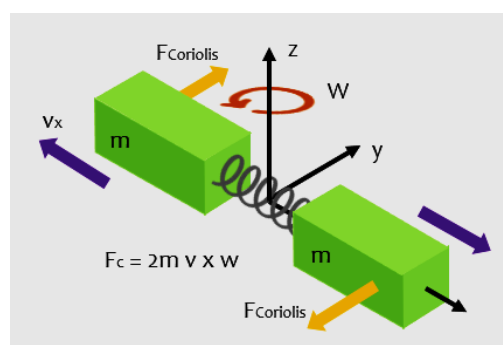


Figura 6. Esquema de un giroscopio [20]

A pesar de ser capaces de responder rápidamente a los cambios, acumulan errores que hacen que las medidas sólo sean reales en intervalos cortos de tiempo. Es por ello que tanto el acelerómetro como el magnetómetro son imprescindibles para compensar las limitaciones de cada uno por separado [28].

2.4 Magnetómetro

Por último, el tercer tipo de sensor de un IMU es el magnetómetro, el cual determina la orientación del dispositivo con respecto al campo magnético terrestre, midiendo su intensidad en sus 3 componentes, según el sistema de referencia del sensor [30].

En cierto instante, si se lleva a cabo el cambio de orientación del sensor, aunque el campo magnético terrestre permanezca uniforme y no se modifique, sus componentes sí que lo harán. De esa forma, teniendo constancia de estas tres componentes, se obtiene el giro experimentando por el sensor, como en la Figura 7 [30].

A pesar de funcionar como una brújula en 3 dimensiones, la variación de otros campos magnéticos puede influir en los datos que recoge, resultando sensible a las interferencias electromagnéticas [30].

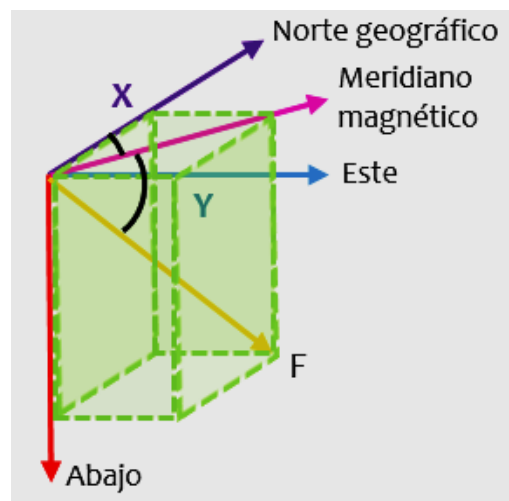


Figura 7. Esquema de un magnetómetro [20]

Como se ha detallado anteriormente, el acelerómetro solo mide inclinaciones, el magnetómetro completa la información sobre los giros alrededor del eje vertical, identificando el ángulo respecto al norte, y el giroscopio será el encargado de la corrección de derivas. Una vez obtenida la orientación íntegra del IMU, existen dos formas de representarla; mediante los Ángulos de Euler, o a través de los Cuaterniones [31].

2.5 Ángulos de Euler

Los Ángulos de Euler están compuestos por tres coordenadas angulares, las cuales expresan la variación del giro de un dispositivo entre dos posiciones, para de esta forma, representar su orientación espacial [31].

Esta variación se reproduce mediante tres giros sucesivos alrededor de los ejes de coordenadas, como en la Figura 8, diferenciándose tres rotaciones: yaw, pitch y roll. Gracias a estas se puede llevar a cabo la transformación de un vector denotado en un sistema de coordenadas β , a otro α . Sin embargo, el orden en el que estos se producen es fundamental, ya que, aunque se produzca la misma alteración en los ángulos, pero con un orden diferente, dicho giro cambiará [31].

La rotación yaw tiene de referencia el eje z del sistema de coordenadas que será rotado (β). Los ejes que se obtengan de esta variación se identifican con el superíndice ψ [32].

La rotación pitch tiene de referencia el eje rotado y que se ha obtenido anteriormente, con el superíndice ψ . De igual forma, los ejes que se obtengan se identifican con el superíndice θ [33].

La rotación roll tiene de referencia el eje rotado x que se ha obtenido anteriormente, con el superíndice θ . Finalmente, los ejes rotados que se obtengan forman la rotación completa entre los sistemas de coordenadas β y α [32].

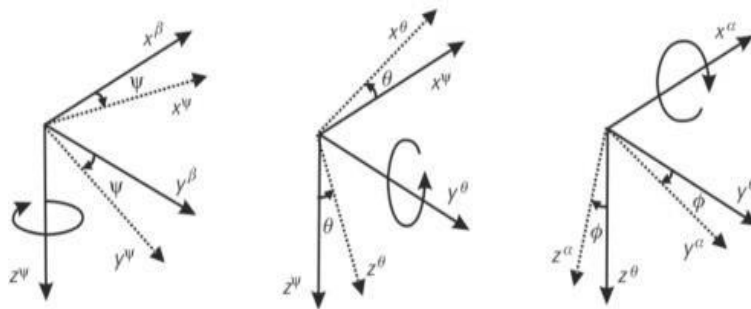


Figura 8. Rotaciones consecutivas de los Ángulos de Euler [33]

Esta forma, a pesar de ser la más intuitiva, puede obtener una indeterminación si dos de los ejes que son girados en las tres dimensiones alcanzan la misma dirección, llegando a alinearse, como en la Figura 9. Este fenómeno se denomina Bloqueo del Cardan (*Gimbal Lock*, en inglés), y ocasiona la pérdida de un grado de libertad y futuros movimientos alterados [31].

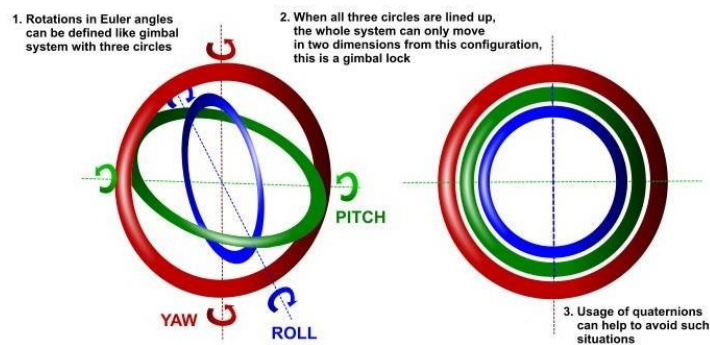


Figura 9. Bloqueo del Cardan (*Gimbal Lock*) [34]

Para evitar estos errores, se emplean los Cuaterniones.

2.6 Cuaterniones

Los cuaterniones son componentes matemáticos con base imaginaria, formados por vectores de cuatro elementos, útiles para expresar una variación de la rotación en tres dimensiones, empleando un determinado sistema de coordenadas. Mediante estos cuatro elementos, tres de ellos complejos, y uno real, se obtienen las referencias precisas para representar la orientación del sensor que irá adherido a un cuerpo [31].

Para comprender la representación, se considera elemento de \mathfrak{R}^4 , de forma que:

$n = a i + b j + c k + d = n^{\rightarrow} + n_0$, donde a, b, c y d son números reales, e i, j y k son vectores unitarios conducidos por los ejes x, y, z respectivamente [35].

De esta forma, un cuaternión es una unidad de cuaternión si $n_0 = \cos\theta$ y $|n^{\rightarrow}| = \sin\theta$ para algún ángulo θ . Los cuaterniones unitarios se pueden utilizar para rotar un vector u^{\rightarrow} [35].

Para realizar esta rotación se aplica la multiplicación de cuaterniones dobles: $v = n u^{\rightarrow} n^*$, donde n^* es el conjugado complejo del cuaternión n, siendo $n^* = -a i + b j + c k + d$ [35].

Esta operación rota el vector u^{\rightarrow} en un ángulo 2θ alrededor del eje n^{\rightarrow} . La operación que usa la multiplicación de cuaterniones dobles es equivalente a una multiplicación de matrices de forma que $v = n u^{\rightarrow} n^* = R u^{\rightarrow}$, donde, siempre que n sea un cuaternión unitario, se cumple que R es igual

$$\begin{matrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(a b - c d) & 2(a c + b d) \\ 2(a b + c d) & d^2 + b^2 - a^2 - c^2 & 2(b c - a d) \\ 2(a c - b d) & 2(b c + a d) & d^2 + c^2 - b^2 - a^2 \end{matrix} \quad [35].$$

Es por ello que, a pesar de su complejidad, su útil funcionamiento los coloca por encima de las coordenadas habituales o los Ángulos de Euler.

Acompañados de los giróscopos inerciales, los cuaterniones comenzaron a aplicarse para guiar a los satélites. Hoy en día, gran cantidad de móviles lo utilizan para establecer su orientación. Y en el ámbito orientado a este trabajo, los sistemas de captura de movimiento aplicados en la animación suelen emplear esta forma de representación de los giros que experimentan los sensores inerciales [31].

2.7 Ventajas e inconvenientes aplicados

Además de los sistemas basados en sensores inerciales (IMUs), relacionados con las técnicas de captura de movimientos más usadas, también existen los marcadores de realidad aumentada (Marcadores AR) y la videofotogrametría.

Estos marcadores detectan la orientación y la posición en el espacio mediante patrones planos, de los cuales se conocen la forma y las dimensiones, usando únicamente una cámara de video. Sus principales aplicaciones están relacionadas con la realidad virtual y la robótica, aunque también se usan como herramienta de medición en la captura de movimientos. Existen librerías para la



identificación y el seguimiento de marcadores AR que, colocándolos sobre segmentos del cuerpo humano, realizan capturas de movimientos con una cámara. Esta técnica es muy barata y conocida, ya que solo requiere el uso de un móvil, tal como hacen en las aplicaciones de realidad aumentada [20].

Por otro lado, la videofotogrametría, basada en la fotogrametría, usa varias cámaras de video que reconstruyen entornos y movimientos en 3D. De esta forma, estudian y definen dimensiones, forma y posición en el espacio de un cuerpo, a través de los datos que recogen las cámaras [20].

Las unidades inerciales que se están tratando, además de presentar un tamaño reducido y un bajo coste, obtienen los resultados en tiempo real. Sin embargo, pueden llegar a presentar derivas, y su precisión es menor a la de la fotogrametría, por ejemplo. Además, los grados de libertad son únicamente rotacionales, siendo incapaces de medir traslaciones [36].

Para el ámbito que este trabajo compete, por su capacidad, versatilidad y precisión, el principal sistema en animación y captura de movimiento, es la videofotogrametría. No obstante, debido a su alto coste y dificultad, los IMUs se convierten en una buena opción intermedia para este campo. Además, el método de representación que emplean, los cuaterniones, cuenta con una gran facilidad de programación, aparte de solucionar el fenómeno del *Gimbal Lock*. Aunque los sensores que se utilizan en este caso representan sus datos con Ángulos de Euler, esto ayudará a observar este problema de forma práctica y visual [36].

Capítulo 3. Hardware empleado

Como se ha expuesto en el anterior capítulo, la unidad de medición inercial que se empleará para completar los objetivos propuestos será el MTw™, de la marca Xsens.

Xsens es uno de los líderes en tecnología y productos de seguimiento de movimiento 3D. Su innovación en fusión de sensores permite una completa interacción entre el mundo físico y digital. A través de dispositivos electrónicos de consumo y aplicaciones profesionales, consigue abarcar el campo de la animación de personajes en 3D, análisis de movimiento y control y estabilización industrial.

Este capítulo está basado en el manual de usuario de MTw Awinda, al igual que todas las imágenes aportadas [25].

3.1 Componentes

El kit de desarrollo de MTw Awinda, del cual se dispone (Figura 10) contiene los siguientes elementos:

- 6 MTw's (sensores inerciales).
- 1 estación Awinda.
- 1 cable USB.
- 1 cable de alimentación.
- 1 USB Awinda.
- 1 juego de tiras corporales de velcro para el cuerpo completo.
- Software MT Manager



Figura 10. Kit de desarrollo de MTw Awinda [25]

Sin embargo, para este proyecto, emplearemos únicamente 3 sensores, sin necesidad de hacer uso del traje completo, ya que la animación prevista será enfocada a ciertas partes del cuerpo. A continuación, se detallan cada uno de los instrumentos empleados:

3.1.1 Rastreadores de movimiento

Las 3 unidades inerciales en miniatura utilizadas contienen un barómetro, para medir la presión atmosférica, acelerómetros lineales, giroscopios de velocidad y magnetómetros 3D, que funcionarán como una brújula, como hemos visto anteriormente. Combinando estos elementos con los algoritmos Xsens se obtiene una orientación 3D del objeto al que se adhieren, con una determinada deriva, la cual se estudiará en secciones posteriores.

En el lado frontal dispone de conexión microUSB para ser conectado a la estación Awinda, y un interruptor para ser apagado. En la parte posterior, las indicaciones LED muestran una combinación de los estados del dispositivo. Además, la carcasa tiene un parche de velcro en la zona inferior, para una fácil conexión del sensor a las tiras de velcro.

Cada uno de los MTw se alimentan mediante la estación Awinda, y con una hora de conexión, se recargan completamente, alcanzando una autonomía de 6,5 horas.



Figura 11. Rastreadores de movimiento MTw [25]

El MTw calcula la orientación del cuerpo al que se ha adherido relacionando el sistema de coordenadas permanente del sensor, con el de referencia en la tierra. De forma predeterminada, el sistema de coordenadas se define como un sistema de coordenadas cartesiano, como sigue en la Figura 12, con:

- Eje X, positivo cuando apunta al norte magnético local (rotación roll).
- Eje Y, según las coordenadas de la mano derecha (Oeste) (rotación pitch).
- Eje Z, positivo al señalar hacia arriba (rotación yaw).



Figura 12. Sistema de coordenadas predeterminado de un MTw [25]

3.1.2 Estación Awinda

La estación Awinda se encarga de la recepción de datos inalámbricos sincronizados de todos los sensores, los cuales se conectarán de forma inalámbrica.

En la parte superior contiene los acoplamientos micro USB para conectar hasta 6 MTw simultáneamente, los cuales son cargados al mismo tiempo. Además, dispone de una antena de 2,4 GHz plegable y giratoria para un alcance máximo.

En uno de los laterales se observan los LED que también muestran los estados del dispositivo. En el lado opuesto, se encuentra el conector de alimentación de CC, el conector USB y 4 conectores de E / S de sincronización BNC para la sincronización con dispositivos externos.



Figura 13. Estación Awinda [25]

Esta estación, al funcionar también como fuente de alimentación, es necesaria para cargar los MTw o para cambiar de apagado a encendido.

3.1.3 USB Awinda

Este USB contiene las mismas capacidades inalámbricas que la estación Awinda; controlar la recepción de datos inalámbricos sincronizados de todos los sensores inerciales, conectados de forma inalámbrica.



Figura 14. USB Awinda [25]

3.1.4 Software MT Manager

El kit de desarrollo de MTw Awinda se provee con un paquete de software denominado MT Manager, útil para visualizar y registrar los datos que recojan los sensores inerciales.

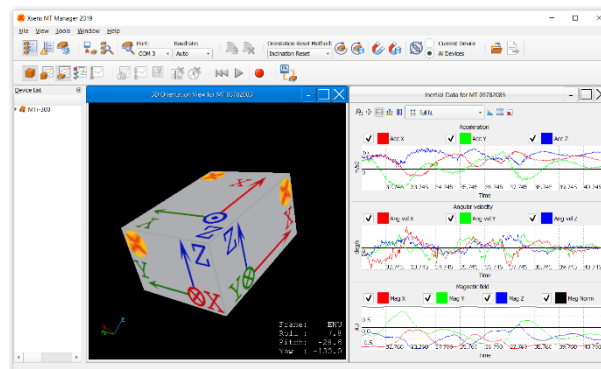


Figura 15. Software MT Manager [25]

En la sección 3.3.1 Puesta en marcha, del Capítulo 3, sobre el hardware y software, se introducirá su manejo a la hora de configurar y grabar los movimientos de los MTw.

3.2 Filtro Xsens Kalman

La orientación de estos sensores se calcula mediante el filtro Kalman, orientado para establecer 3 grados de libertad en el movimiento humano. Se trata de un algoritmo que fusiona los datos de inercia 3D con los del magnetómetro 3D, estimando la orientación con respecto a un sistema de coordenadas terrestres fijas. Obviamente, este proceso también lidia con transmisiones inalámbricas [25 y 37].

De esta forma, se realiza un control de las variables, como los sesgos del sensor o las características del campo magnético de ese instante, mientras se calcula la orientación. Esta última operación tendrá una duración relativa, dependiendo de la estabilización del MTw y el tiempo que se invierta en la corrección de estos errores [36 y 37].

Para disminuir el tiempo de estabilización, la última polarización que el giroscopio ha obtenido se puede almacenar en la memoria no volátil de la unidad del sensor. Esta será utilizada si se vuelve a usar después de un breve período de apagado [37].

3.3 Software

3.3.1 Puesta en marcha

Antes de comenzar con el uso de los sensores, es necesario que hayan estado conectados a la estación Awinda, y esta, a su vez, a una fuente de alimentación, para completar la batería.

1. En primer lugar, la estación Awinda, con todos los sensores disponibles conectados, o el USB Awinda, debe estar conectado al puerto USB del PC, como se observa en el esquema de la Figura 16.

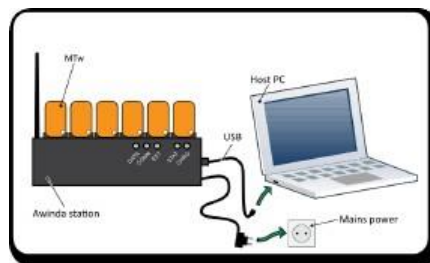


Figura 16. Paso 1 Puesta en marcha [25]

2. En este paso entra en funcionamiento el Software del que dispone el propio kit de Xsens, MT Manager, el cual se puede instalar en el PC desde la página web de Xsens.

Una vez esté conectada la estación Awinda a la red eléctrica, si la ID y los MTw acoplados no se muestran en la lista de dispositivos, como en la Figura 18, se debe seleccionar la opción *Scan All Ports*, asociado al icono de la Figura 17.



Figura 17. Icono para escanear todos los puertos (Scan All Ports) MT Manager [25]

Device List		
MTw	00B41319	Measuring
Device Infor...		
Filter Settin...	human	
Status Infor...		
Power	Power On	
Battery Le...	99%	
MTw	00B41DCB	Measuring
MTw	00B41DD0	Measuring
Awinda S...	01200588	Config Mode
Device Infor...		
Product C...	AW-A2	
Communi...	COM3	

Figura 18. Lista de dispositivos acoplados MT Manager [25]

3. A continuación, se debe acceder al icono correspondiente a la configuración inalámbrica, Figura 19. Como se puede observar en la Figura 20, el menú de configuración se divide en dos secciones:

- A la izquierda se encuentran los detalles sobre los Master Awinda detectados (en este caso siempre será uno, la estación Awinda), junto con la tasa de actualización y el canal de radio. Este se puede configurar seleccionando una de las varias opciones de las que consta, para la comunicación entre en Master y los MTw.
- A la derecha, los detalles sobre cada uno de los MTw, y su correspondiente intensidad de la señal de radio asociada.



Figura 19. Icono del menú de configuración MT Manager [25]

Wireless Masters			MTw's		
Device ID	Rate (Hz)	Channel	Device ID	Station ID	Signal Strength (dBm)
01200588	100	11	00B41319	01200588	Unknown
			00B41DCB	01200588	Unknown
			00B41DD0	01200588	Unknown

Figura 20. Menú de configuración MT Manager [25]

4. Una vez seleccionado el canal, ya sea el de defecto, u otro deseado, se selecciona el botón *Enable All Wireless Masters*, para que el transceptor de radio del Awinda Master se conecte y busque los MTw en este canal.

5. Cuando se desacopla un MTw, como en la Figura 21, su radio busca al Master al cual debe conectarse. De esta forma y con todos los sensores desacoplados y conectados, se puede configurar la tasa de actualización en el menú de configuración.

Como cada MTw hace una conexión con el Master Awinda, esta tasa máxima disminuye en consecuencia. Seleccionando el botón *Rate (Hz)*, se accede al menú desplegable de tasas disponibles, como en la Figura 22. La predeterminada siempre será un valor menor al máximo, garantizando las retransmisiones durante la grabación. Si esta se supera, se pueden reducir o eliminar ciertas retransmisiones.

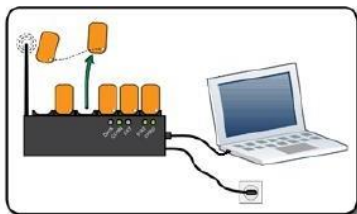


Figura 21. Paso 5 Puesta en marcha [25]

Wireless Masters			MTw's		
Device ID	Rate (Hz)	Channel	Device ID	Station ID	Signal Strength (dBm)
01200588	120	11	00B41319	01200588	Unknown
	100		00B41DCB	01200588	Unknown
	80		00B41DD0	01200588	Unknown
	60				
	40				

Figura 22. Tasas del menú de configuración MT Manager [25]

6. Una vez realizadas todas las configuraciones pertinentes, se comienzan a desacoplar cada uno de los sensores, como se indica en la Figura 23, y se selecciona la opción *Start Measurement on Wireless Master*, también a través del menú de configuración, asegurando el reposo de los MTw. Se recomienda medir y registrar los datos en el mismo entorno donde se inició la medición.

Como se ha nombrado anteriormente, el filtro Kalman que contienen estos sensores necesita un tiempo de estabilización, un minuto aproximadamente, durante el cual se pueden realizar pequeños movimientos para calentar los filtros.

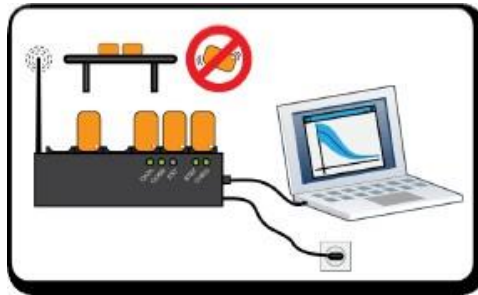


Figura 23. Paso 6 Puesta en marcha [25]

7. Para comprobar si los filtros ya han superado el proceso de estabilización, se ha de constatar que la orientación de los sensores no cambia cuando se encuentra en un estado estacionario, sin perturbaciones magnéticas, como se explica en la Figura 24.

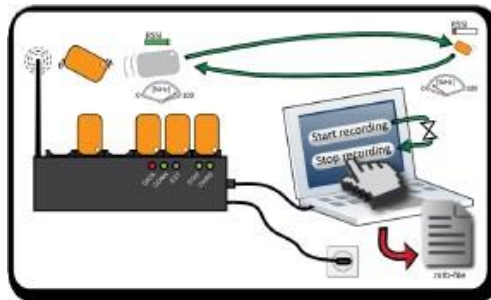


Figura 24. Paso 7 Puesta en marcha [25]

8. Finalmente, en este modo de medición, se puede comenzar la grabación, seleccionando el correspondiente icono que se observa en la Figura 25.



Figura 25. Icono del inicio de grabación MT Manager [25]

3.3.2 Información de salida

Para poder realizar la captura y su correspondiente exportación, en el Anexo I se tiene una explicación sobre cómo colocar correctamente los sensores en la parte del cuerpo que se pretende animar, y como realizar los movimientos, para luego capturarlos.

Una vez se han puesto en marcha los tres sensores siguiendo los pasos del apartado anterior, y habiéndolos colocado en el propio cuerpo, se debe seleccionar el icono que hace referencia a *Rec*, de la Figura 25. En este momento se llevan a cabo los levantamientos o desplazamientos convenientes, durante el tiempo que se considere oportuno.

Una vez finalizado el proceso de captura, se debe volver a seleccionar el mismo botón de *Rec* para finalizar la grabación. De esta forma, la grabación quedará guardada en la ubicación seleccionada, la cual se puede modificar en la parte superior del botón *Rec*, en el formato MTB (MT Binary Logfile). Esta misma debe ser abierta de nuevo en el mismo software mediante File → Open File, para pasar a su exportación en el formato deseado.

Así pues, mediante el menú File → Export, se abre una ventana para seleccionar los detalles de la exportación, como se puede observar en la Figura 26. Desde aquí se puede establecer la ubicación para su exportación, el nombre del archivo, el formato del fichero y el filtro utilizado, el cual no se puede modificar. Además, el formato del archivo que se guardará, solo puede ser de tipo TXT. Esto será un inconveniente a la hora de importar los datos capturados en el software de animación 3D Blender, ya que este último solo acepta formatos de tipo BVH. Para ello se adjunta en el Anexo II la comparación entre estos dos tipos de formatos, para poder unirlos y observar los resultados, mediante la ayuda también del Anexo III sobre la importación en Blender.

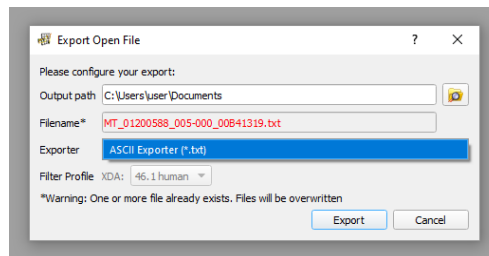


Figura 26. Menú de exportación de la captura de MT Manager [25]

Buscando en la ubicación que se ha escogido, se tendrán tres ficheros TXT, correspondientes a la captura que ha realizado a la vez cada uno de los sensores. Estos ficheros se llamarán igual que los sensores, para poder identificarlos y volcar sus datos en el lugar adecuado.

Finalmente, y con la ayuda de los anexos nombrados, se podrá realizar cualquier captura y visualizarla en Blender y, sobretodo, llevar a cabo las dos prácticas que se extienden a continuación, objetivo principal de este proyecto, facilitando la aplicación de esta tecnología en la enseñanza.

Capítulo 4. Resultados. Aplicación a la enseñanza

La evolución de los objetivos se plasma a continuación. Para ello se exponen las dos prácticas dirigidas a los alumnos del Grado en Tecnología Digitales y Multimedia de la ETSIT.

4.1 Sonido, Óptica y Movimiento

4.1.1 Introducción

La asignatura de Sonido, Óptica y Movimiento del Grado en TDM tiene, entre otros objetivos, el de profundizar en aspectos de la Mecánica, necesarios para comprender las bases de algunas técnicas utilizadas en Tecnologías Digital y Multimedia. Entre estas se encuentran los sistemas de captura y representación de movimientos, los motores de física de los sistemas de animación, y las bases de la acústica y la iluminación aplicadas a las tecnologías multimedia, así como las comunicaciones ópticas. En concreto, la primera parte de la asignatura se dedica a ampliar los conocimientos de Mecánica explicados en el curso anterior, estudiando el movimiento 3D. Se analizan las formas de representarlo y los fundamentos de las principales técnicas de captura y representación de movimientos a partir de videoanálisis, marcadores de realidad aumentada, video fotogrametría y sistemas inerciales.

Uno de los aspectos claves para el análisis y representación de movimientos 3D es comprender la naturaleza de los giros finitos. Los alumnos están acostumbrados a visualizar movimientos planos, donde los giros obedecen a las reglas del álgebra vectorial, y tienen dificultades para entender las diferentes formas de representación de los giros y las pautas que siguen las operaciones de composición en su aplicación al estudio de los desplazamientos finitos.

Este no es un problema específico de los estudiantes del GTDM. El estudio de la representación de giros en 3D es necesario en otras titulaciones, como las relacionadas con la Ingeniería Mecánica, la Tecnología Aeroespacial y la Ingeniería Biomédica. En todos los casos, los alumnos suelen tener dificultades para visualizar y comprender, de forma intuitiva, aspectos que son difíciles de representar de forma interactiva.

Sin embargo, el uso de sensores inerciales, IMUs, permite realizar movimientos sobre un objeto concreto y, en tiempo real, tomar medidas razonablemente precisas de las magnitudes matemáticas asociadas al giro, pudiendo ver más tarde su representación gráfica en un sistema de representación 3D. Por ello, pueden constituir una herramienta docente muy potente en las aplicaciones al estudio del movimiento en áreas relacionadas con la Mecánica y en sus aplicaciones a cualquiera de las áreas de ingeniería anteriormente citadas.

4.1.2 *Objetivos*

Los objetivos de aprendizaje de la práctica son los siguientes:

- Complementar la formación teórica sobre técnicas MOCAP, en particular sobre IMUs, trabajando con un equipo comercial usado en animación y análisis de movimientos humanos.
- Analizar los problemas de deriva de estas técnicas.
- Aplicarlo a la medición de ángulos de Euler asociados a giros 3D, analizando:
 - La diferencia entre ángulos extrínsecos (ejes fijos) e intrínsecos (ejes móviles).
 - El resultado de aplicar giros consecutivos en diferente orden.
 - Las reglas de composición de giros.
 - El problema de Bloqueo del Cardan cuando se usan ejes móviles y la conveniencia de emplear cuaterniones.

4.1.3 *Desarrollo*

4.1.3.1 *Equipamiento necesario*

Se usará un sensor inercial con el software asociado que permita la captura en tiempo real de los giros desde una posición de referencia y su representación en el ordenador.

Este sensor inercial MTw, de la marca Xsens, va acompañado de la base de conexiones Awinda y el software de adquisición de datos MT Manager, que se describen en el Capítulo 3 de esta Memoria.



Figura 27. Sensor inercial y sistema de referencia local [25]

Además, se utilizará un dispositivo de referencia que permita colocar al sensor en posiciones fijas y perfectamente reproducibles, con la finalidad de acotar los posibles errores experimentales.

4.1.3.2 *Medida de la deriva del sensor*

Uno de los problemas de los sensores inerciales, es que basan la medida de los ángulos en la integración de la velocidad angular registrada mediante un giróscopo MEMS. Evidentemente, cualquier pequeño error sistemático que aparezca en la medida de velocidades angulares se traducirá en una pequeña deriva que puede dar lugar a errores importantes en los ángulos.

Para evitar este problema, los IMUs utilizan información redundante procedentes del acelerómetro (que trabaja como inclinómetro) y del magnetómetro. Esta información se fusiona con la del giroscopio mediante algoritmos basados en filtros de Kalman, lo que permite corregir de forma bastante satisfactoria este problema. No obstante, siempre queda alguna deriva que se va a visualizar en esta primera experiencia.

PROTOCOLO DE MEDIDA

1. Coloca el sensor en el dispositivo de posicionamiento y empieza a medir.
2. Déjalo en reposo unos 5s y a continuación muévelo un rango amplio durante otros 3s.
3. Vuelve a colocarlo en la misma posición y déjalo en reposo otros 5s.
4. Muévelo otra vez durante 3s.
5. Déjalo en la misma posición y espera otros 5 segundos antes de parar la medida.

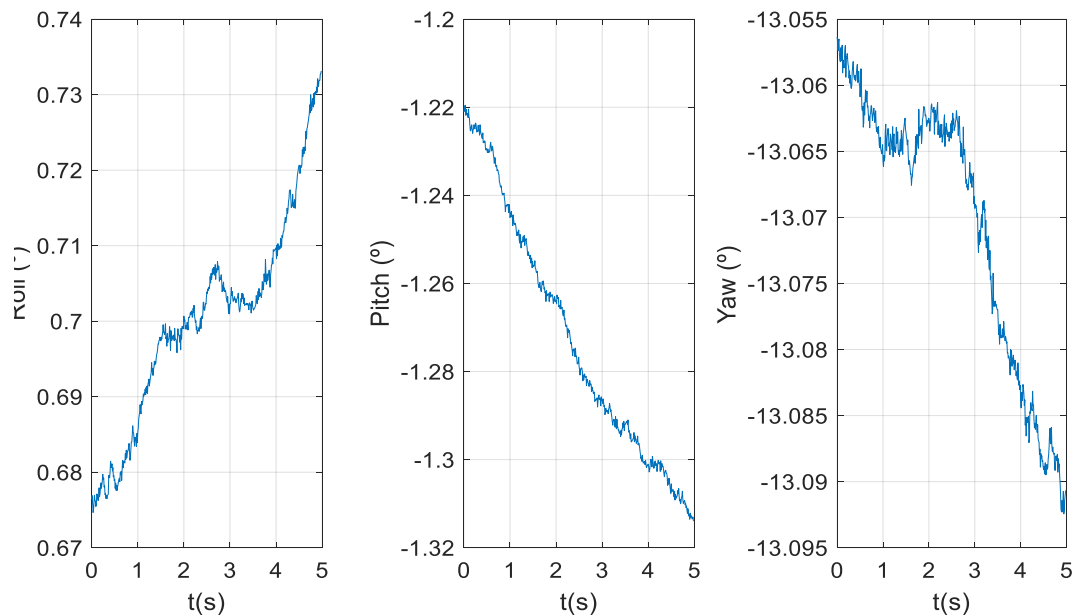


Figura 28. Ejemplo de deriva en la medida de los tres ángulos

TRATAMIENTO DE DATOS

- Exporta ahora las medidas a Python o Matlab.
- Identifica los periodos de reposo (los ángulos cambian bastante poco, puedes calcular la velocidad y poner como condición que sea menor de $0.1 \text{ } ^\circ/\text{s}$).
- Representa gráficamente los tres ángulos frente al tiempo en los periodos de reposo. Observa que hay una pequeña variación sistemática en los tres ángulos. No es muy grande pero sí es continua.
- Usa uno de los periodos, por ejemplo, el central, para calcular la velocidad de deriva.
- Calcula la diferencia entre la primera medida del principio y la del final.

RESULTADOS

- ¿Cuál es la velocidad de deriva del roll?
- ¿Cuál es la velocidad de deriva del pitch?
- ¿Cuál es la deriva del roll?
- En una medida de la duración total de la que has realizado, y suponiendo que la deriva fuese constante, calcula el ángulo ficticio que se mediría.
- ¿La diferencia calculada en el punto anterior es la misma que la que se observa comparando la primera medida con la última? ¿Por qué?

4.1.3.3 Visualizar giros

En esta parte se van a identificar los tres ejes del sensor y el giro asociado:

- Eje X (rojo) → Roll
- Eje Y (verde) → Pitch
- Eje Z (azul) → Yaw

1. Coloca el sensor en el dispositivo de posicionamiento y ponlo a cero.
2. Muévelo alrededor el eje X unos 90° y luego otros 90°. Observa cómo cambia solo el roll.
3. Repite la operación, pero moviéndolo en sentido contrario. Comprueba la regla de la mano derecha para los ángulos.
4. Repite el movimiento alrededor del eje Y (verde).
5. Repite girando alrededor del eje Z (azul).

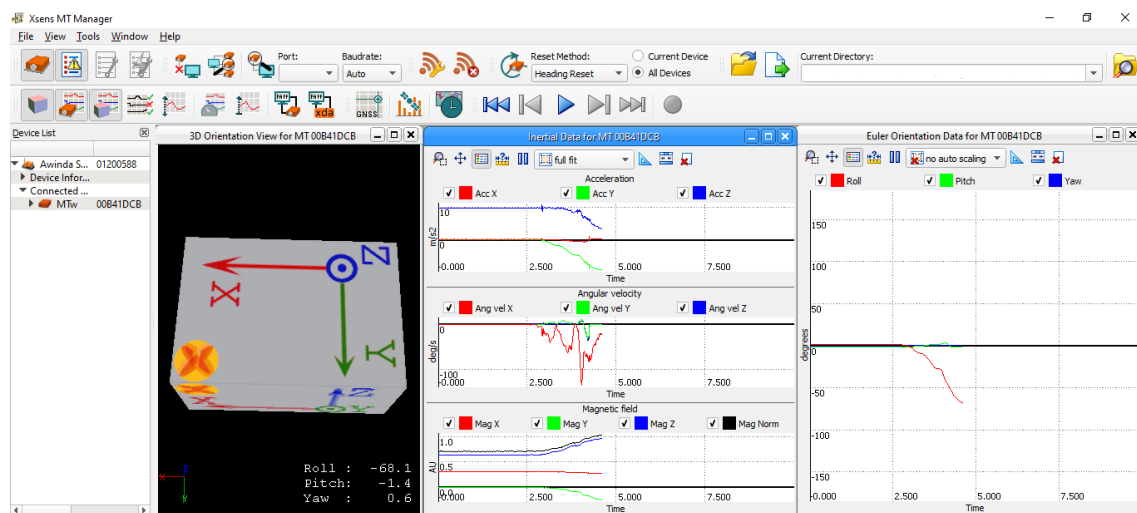


Figura 29. Pantalla del Xsens MT Manager, durante un giro negativo alrededor de X

4.1.3.4 Orden de los giros

El curso pasado, al estudiar los movimientos planos, se trabajaba con los giros como si fuesen vectores perpendiculares al plano del movimiento. Se podían sumar en cualquier orden: el resultado siempre era equivalente al giro compuesto. Y la derivada era la velocidad angular.

En esta parte de la práctica se va a comprobar que los giros en 3D ni siquiera cumplen la propiedad conmutativa. Es decir, el efecto al hacer dos giros iguales (respecto a ejes diferentes, por ejemplo, X (roll) y Z (yaw)), la posición final del sensor es diferente si se hace la secuencia XZ que si se hace la ZX.

1. Coloca el sensor en el dispositivo de posicionamiento.
2. Por a cero el sensor.
3. Gíralo 90° alrededor del eje Z y luego 90° alrededor del eje X. Captura la posición final.
4. Vuelve al paso 1 y repite todo, pero primero el giro X y luego el giro Y.

¿Se han quedado en la misma posición?

La secuencia de los giros afecta al giro real. Por eso al usar los ángulos de Euler se debe especificar siempre el orden de los giros. Los mismos valores de roll, pitch y yaw darán posiciones completamente diferentes en función del orden de los giros.

Prueba con otras combinaciones a pares o con los tres ejes. Por ejemplo XYZ (90° cada uno) frente a ZXY.

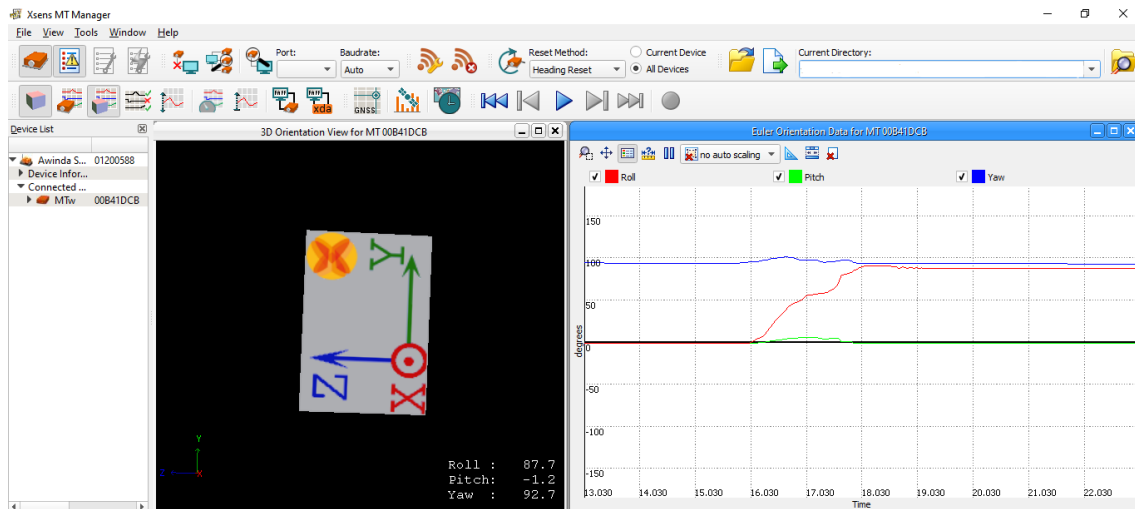


Figura 30. Efecto del orden de los giros roll - yaw

4.1.3.5 Convertir secuencias de giros

En este apartado se va a repasar como se multiplican las matrices asociadas a los giros en cada eje, en el caso de ángulos intrínsecos.

1. Coloca el sensor en la posición de referencia.
2. Gíralo 90° en cada eje, siguiendo la secuencia Z (yaw) - Y (pitch) - X (roll).
3. Apunta los ángulos que aparecen en el ordenador (corresponden a la secuencia X - Y - Z).
4. Calcula la matriz asociada a cada giro del paso 2 y multiplícalas en el orden adecuado para obtener la matriz del giro.
5. Calcula la misma matriz usando los datos del sensor.
6. Comprueba que son iguales.

También se pueden ver las correspondencias usando un convertidor de rotaciones. En la dirección <https://www.andre-gaschler.com/rotationconverter/> se encuentra una calculadora que permite expresar en cualquier notación los ángulos de Euler y cambiar de secuencia.

Úsala para realizar los movimientos siguientes (empieza siempre desde la posición de referencia):

- -90° Z; 90° X; 90° Y
- 90° Z; - 90° Y

En cada caso, apunta los ángulos medidos por el sensor, y comprueba la equivalencia con la serie aplicada usando el convertidor de rotaciones.

4.1.3.6 Bloqueo del Cardan (Gimbal Lock)

Finalmente, se va a profundizar en un problema que se puede tener en la representación de giros usando los ángulos de Euler intrínsecos: el denominado bloqueo del Cardán ó Gimbal lock.

En la secuencia del sensor Xsens, que sigue la secuencia XYZ, el bloqueo se produce cuando el pitch (giro Y, toma un valor de 90°). Entonces, los ángulos de roll y yaw se acoplan (entran como una suma dentro de los senos y dos cosenos) y es imposible distinguir uno de otro.

En el enlace https://es.gaz.wiki/wiki/Gimbal_lock se encuentra una demostración matemática.

Eso no quiere decir que se bloquee nada, ni que los ángulos de Euler dejen de ser válidos. Si introduces una secuencia con el pitch de 90° se obtendrá una posición real correspondiente a ese valor.

El problema práctico, y por el que deben evitarse posiciones próximas al bloqueo, es que cerca de esas posiciones, pequeños movimientos reales del sensor pueden dar lugar a oscilaciones muy fuertes en los otros dos ángulos, porque dependiendo de cambios mínimos en la posición real del sensor, los ángulos yaw y roll pueden cambiar mucho. Esto tiene consecuencias sobre los errores de medida, disparándose, y sobre las representaciones, que pueden aparecer con movimientos aparentemente erráticos.

Para ver esto, sigue los siguientes pasos:

1. Coloca el sensor en la posición de referencia y ponlo a cero.
2. Ahora gíralo un pitch de 90° . Ten cuidado de que los otros no cambien.
3. Cuando lo tengas en esa posición, muévelo suavemente alrededor de la misma en las otras direcciones (muy poco, algo casi imperceptible).
4. Observa los cambios amplificados de los ángulos en X y Z. Decenas de grados que no parecen corresponder a unos movimientos tan limitados, ¿no?

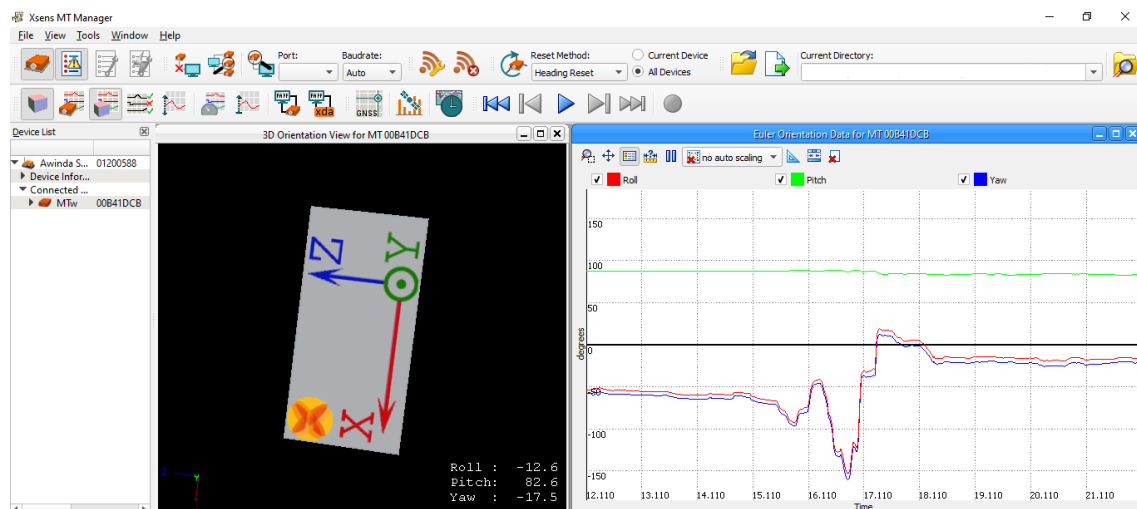


Figura 31. Bloqueo del Cardan cuando el giro en Y es de 90° (para la secuencia XYZ, como la del sensor Xsens). Cambios muy pequeños en la orientación del sensor, provocan oscilaciones de decenas de grados en X y Z

Este problema se evita utilizando cuaterniones en lugar de ángulos de Euler, lo que hace que la variación de las componentes del giro no tenga las oscilaciones, ni los errores que aparecen si se mide con una secuencia de Euler, cerca de un punto de bloqueo.



4.2 Diseño gráfico

4.2.1 Introducción

Para la asignatura Diseño gráfico se ha decidido emplear el mismo sensor inercial MTw™, de la marca Xsens, para registrar una animación real de un brazo e importarla en Blender para animar el brazo de un avatar. Para ello se deben crear ciertos cimientos sobre este sistema, desde su funcionamiento, hasta su integración con los softwares elegidos. Estos pasos se detallarán en los siguientes puntos, durante la guía de la práctica.

4.2.2 Objetivos

- Aprender el manejo del kit de desarrollo MTw Awinda: componentes del equipo, características del mismo, registro de animaciones haciendo uso de los sensores MTw.
- Determinar la ubicación adecuada de los sensores MTw sobre un actor para realizar la captura de movimiento del brazo
- Realizar la captura del movimiento con el software MT Manager de Xsens y exportarla a un fichero .txt.
- Extraer la información relevante del fichero .txt e importarla a un fichero .bvh con la definición de un esqueleto.
- Importar en Blender el fichero .bvh con la información del esqueleto y los datos de la captura de movimiento.
- Reproducir en Blender la animación realizada.

4.2.3 Desarrollo

NOTA: La práctica se puede realizar completa, o empezar en el Punto 3, dependiendo de la situación sanitaria por el Covid-19. Si no es posible acceder al laboratorio, se empezará en el Punto 3, y se partirá de 3 ficheros .txt grabados previamente como se indica en los Puntos 1 y 2, con los ángulos correspondientes a los movimientos realizados con brazo, antebrazo y mano. Se puede trabajar, en este caso, en aula de informática o portátil personal.

4.2.3.1 Equipamiento necesario

- Material del laboratorio de Mocap: 3 sensores MTw™ de Xsens, estación Awinda, PC (en caso de empezar la práctica en el Punto 1).
- 3 ficheros .txt correspondientes al registro de una animación del brazo con 3 sensores MTw™ de Xsens.
- 1 fichero .bvh con dos apartados: Hierarchy (donde se detalla la definición de un esqueleto que se animará en Blender) y Motion (apartado que se rellenará con los datos de la animación).
- 1 fichero .xlsx preparado para rellenar la información correspondiente a los ángulos de Euler de brazo, antebrazo y muñeca.
- 1 fichero .obj con un avatar (modelo y armadura).



4.2.3.2 Procedimiento

REGISTRO DE LA ANIMACIÓN

1. La estación Awinda, con todos los sensores disponibles conectados, debe estar conectada al puerto USB del PC.
2. Desde el software MT Manager, comprobar que los MTw se muestran en la lista de dispositivos. En caso contrario, seleccionar la opción *Scan All Ports*.
3. Acceder a la configuración inalámbrica y seleccionar el canal de radio y la tasa de actualización. En principio, la dejaremos en el valor por defecto, 100 Hz.
4. Pulsar en el botón *Enable All Wireless Masters* para que la estación Awinda se conecte con los MTw en el canal seleccionado.
5. Desacoplar los sensores y seleccionar la opción *Start Measurement on Wireless Master*.
6. Dejar un tiempo mínimo de un minuto para asegurar su estabilización.
7. Colocar los tres sensores en la ubicación requerida para capturar el movimiento del brazo. Se hace uso para ello de cintas con velcro. Las cintas se sitúan en brazo, antebrazo y mano.
8. Comenzar la grabación pulsando sobre el botón *Rec*.
9. Mover el brazo siguiendo los movimientos detallados en documento adjunto.
10. Finalizar la grabación pulsando de nuevo *Rec*.
11. La grabación queda automáticamente guardada en la carpeta de ubicación (modificable en la parte derecha superior, arriba del botón de *Rec*), en un fichero de extensión *.mtb*.

EXPORTACIÓN DE LA ANIMACIÓN A FICHERO .TXT

1. Abrir el fichero *.mtb* desde el software MT Manager, menú File – Open File. Es posible visualizar las gráficas que ha generado la captura, así como el sensor en movimiento.
2. Exportar desde el menú File – Export, indicando la ubicación donde se exportará, el nombre del archivo y el formato del mismo (la única opción disponible es *.txt*). Se crearán 3 archivos *.txt* correspondientes a los 3 sensores usados.

INCORPORACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS FICHEROS .TXT A UN FICHERO .BVH CON UN ESQUELETO

1. Se dispone de un fichero *.bvh* con la definición del esqueleto que se va a animar (apartado *Hierarchy*) y la información de la animación de las distintas articulaciones (apartado *Motion*). Hay que actualizar el contenido del apartado *Motion* con la información de los ficheros *.txt* exportados desde MT Manager.
2. En primer lugar, hay que indicar el número total de frames y el tiempo entre frames.
 - Frames: se puede obtener de los ficheros *.txt*. En el caso de los ficheros grabados previamente, son 1299 frames.
 - Frame time (1/fs). En el caso de los ficheros grabados previamente, será $1/100 = 0.01s$.
3. En segundo lugar, hay que copiar la información de la animación en sí. En el fichero *.bvh*, la información se estructura en una matriz de tantas filas como frames registrados, y 138 columnas, correspondientes a los ángulos de Euler de cada articulación, más la posición X,Y,Z de la raíz de la estructura (en nuestro caso, la cadera).

Todas las articulaciones del esqueleto tendrán como ángulos de Euler (0, 0, 0), excepto las correspondientes a hombro, codo y muñeca, que deberán tomar sus ángulos en cada frame de la información contenida en los ficheros .txt. En el caso de los ficheros .txt de ejemplo, se registró la información del brazo derecho, motivo por el que hay que rellenar:

- Columnas 28, 29 y 30 para roll, pitch y yaw del hombro (rShldr).
- Columnas 31, 32 y 33 para roll, pitch y yaw del codo (rForeArm).
- Columnas 34, 35 y 36 para roll, pitch y yaw de la muñeca (rHand).

4. Aunque se puede realizar de otras maneras, se puede completar la información siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Antes de copiar la información, abrir los ficheros .txt generados por MT Manager en un editor de texto, y reemplazar los puntos por comas. Una vez realizado este paso, crear un fichero Excel vacío y copiar la información, eliminando la columna correspondiente al número de frame.
- 2) Unir las tres columnas correspondientes a los ángulos de Euler con una fórmula, tipo =A1&" "&B1&" "&C1
- 3) Se suministra un fichero Excel donde ya se han rellenado los valores de la matriz, a falta de indicar los ángulos de Euler correspondientes a las tres articulaciones registradas con los sensores. Completar estas columnas con los datos unidos para cada sensor.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Columnas 1-27 referentes a las articulaciones anterior				rShldr (col 28-30 = roll-pitch-yaw = x-y-z)	rForeArm (col 31-33 = roll-pitch-yaw = x-y-z)	rHand (col 34-36 = roll-pitch-yaw = x-y-z)	Columnas 37-69 referentes al resto de articulaciones post				
2	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
3	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
4	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
5	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
6	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
7	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
8	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
9	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
10	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
11	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				
12	00000000000000000000000000000000							00000000000000000000000000000000				

Figura 32. Fichero Excel con columnas correspondientes a hombro, codo y muñeca

- 4) La última columna de la Excel tiene todos los datos necesarios para completar el fichero .bvh. Se deben seleccionar, copiar y pegar en el archivo .bvh, en la sección de Motion, a continuación del valor de Frame time.
- 5) Finalmente, y antes de guardar el archivo con todos los datos volcados, se debe reemplazar de nuevo la coma por el punto, ya que, de lo contrario, Blender no aceptará el archivo.

IMPORTAR FICHERO .BVH EN BLENDER.

1. Para importar el fichero, acceder a File – Import – Motion Capture (.bvh)
2. Seleccionar la carpeta donde está el fichero y pulsar el botón Import BVH.
3. Indicar el total de frames y los frames por segundo, ya que Blender por defecto genera las animaciones a 24 fps. Para ello, en la parte de la derecha, de la pantalla, Output properties, cambiar:
 - Frame End: número total de frames en el .vvh (en el caso de los ficheros registrados previamente, 1299).
 - Frame Rate: tasa de actualización con la que se ha realizado el registro (100 fps en el caso de los ficheros registrados previamente).



COMPROBAR FUNCIONAMIENTO DE LA ANIMACIÓN EN BLENDER

1. En la línea de tiempo inferior al esqueleto, pulsar sobre Play. El esqueleto comenzará a reproducir la animación grabada. Comprobar que se reproduce correctamente y con los tiempos empleados al hacer el registro.

ANIMAR UN MODELO ESPECÍFICO CON CAPTURA DE MOVIMIENTO PROPIA

1. Importar el modelo humano suministrado mediante File - Import - Wavefront (.obj).
2. Importar el fichero de la captura de movimiento desde File- Import - Motion capture (.bvh).
3. Seleccionar tanto el modelo, como el esqueleto animado, y acceder al menú *Viewport Display* para habilitar la casilla de *Names*, observando así el nombre de los segmentos de ambos objetos importados.
4. Seleccionado el modo postura en el menú de la izquierda superior (*Pose mode*), escoger en primer lugar el segmento del modelo creado que hace referencia al hombro derecho.
5. Añadir una restricción al segmento seleccionado, de tipo *Copy rotation*. Aparecerá un menú.
6. En el primer desplegable denominado *Target*, seleccionar el nombre del fichero donde se tiene la captura de movimiento (es decir, el archivo .bvh).
7. En el segundo desplegable denominado *Bone*, escoger el segmento de la animación captura del cual queremos copiar el movimiento. Por ejemplo, si se ha seleccionado el segmento del hombro, en este desplegable se deberá buscar el nombre rShldr.
8. Repetir el proceso anterior con todos los segmentos que vayan a participar en la animación. En este caso, se hará con los segmentos rShldr, rForeArm y rHand (si la mano no está compuesta por un único segmento, si no que contiene cuatro falanges que se unen a los dedos, se realiza la misma operación con cada una de las falanges).
9. Una vez añadidas todas las restricciones, reproducir la animación, se observará al modelo creado realizando los mismos movimientos que el esqueleto definido por el archivo .bvh.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Conclusión

Como se ha mostrado en el apartado anterior, el objetivo principal que se planteaba en el inicio de este trabajo, se ha cumplido al completo. Se han propuesto y desarrollado dos prácticas diferentes, listas para su aplicación. La primera es de carácter básico, orientada a la descripción de las bases físicas del sistema y a la visualización de los giros en 3D, tanto en la realidad como en la representación en una proyección 2D. La segunda se plantea a nivel de aplicación y utiliza tres sensores para comprender como se elabora un modelo animado.

Para lograr este último paso, como se expone en los objetivos secundarios, se han ido creando diferentes cimientos sobre los IMUs que se han empleado, el software gratuito que incorporan, la conexión entre ambos, y la explicación a modo de tutorial de cada uno de los pasos a seguir para completar la animación en Blender.

Durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha logrado profundizar un poco más en el mundo de los sensores inerciales y la animación 3D. Además, se ha conseguido desarrollar un sistema que pudiese capturar el movimiento humano sin necesidad de disponer de una alta tecnología.

Gracias a la ayuda de los tutores y los expertos en los sensores empleados, se ha trabajado de la forma más correcta en la adquisición y procesado de la información, alcanzando el control, el análisis y la interpretación de los datos que recogen las unidades de medición inercial (IMU), para su consecuente aportación de beneficios y ventajas en la enseñanza.

De esta forma, también se han detectado las posibles ampliaciones que resultan alcanzables en un futuro, y que dotarían al sistema de mayor consistencia y utilidad, siendo expuestas en el siguiente apartado.

5.2 Líneas futuras

El principal objetivo de este proyecto ha sido, evidentemente, el desarrollo de las dos prácticas enfocadas en las asignaturas de Sonido, Óptica y Movimiento, y Diseño Gráfico, del Grado en Tecnología Digital y Multimedia. Por tanto, la línea futura esencial se basaría en la aplicación e integración de esta tecnología en la enseñanza, campo que, como se ha demostrado, presenta retrasos en comparación con los avances de los que se dispone.

Una de las ampliaciones que se podría llevar a cabo sería la captura de movimiento simultánea de más articulaciones del cuerpo humano, utilizando más sensores inalámbricos. Este desarrollo seguiría los mismos pasos descritos, pero con una mayor cantidad de archivos sobre los datos del movimiento. En esta misma línea, también sería posible realizar esta captura en tiempo real, observando mientras se realizan los movimientos, la animación del modelo que se haya creado en Blender.



Este aumento de funcionalidad del método para la captura se pretendía abordar desde un principio. Sin embargo, era necesario usar el software de la marca Xsens llamado MVN Animate o MVN Analyze. El inconveniente de estos fue la necesidad de obtener la licencia para poder hacer uso de ellos, permiso el cual, además de no disponer la universidad, limitaba los usos de las prácticas desarrolladas para los alumnos.

Sobre la eficacia de este sistema, resultaría muy útil modificar el manual descrito en el Anexo II, Punto 4, sobre el volcado manual de los valores generados en el TXT al fichero BVH. Mediante la implementación de un script programado en cualquier lenguaje, podría automatizarse este proceso, requiriendo únicamente el nombre del fichero de entrada (en este caso, cada uno de los TXT generados por los diferentes sensores) y el nombre del fichero de salida (en este caso, el fichero adjunto BVH sobre el cual se pretende volcar la información e importar en Blender).

Anexos

Para poder profundizar en el proceso de aplicación de la técnica MOCAP en la enseñanza, y en las asignaturas escogidas, se elaboran a continuación tutoriales divididos por los pasos a seguir con los diferentes softwares que se han empleado, y la fusión de la información de salida de cada uno de ellos para visualizar los resultados.

Anexo I. MT Manager. Grabación de movimientos IMU

Una vez realizada la puesta en marcha de los sensores Xsens, proceso que se detalla en el Capítulo 3, apartado del software, se lleva a cabo la grabación.

Las unidades MTw, en este caso tres de ellas, deben ir adheridas a las partes del cuerpo mediante cintas fijadas con velcros, suministradas por Xsens.

Para las manos, se disponen de unas cintas que sujetan el sensor mediante un velcro que se adhiere. Para la zona del codo y del hombro, las cintas se sitúan a mitad altura del antebrazo, quedando el sensor en línea con el de la mano, formando entre los tres una cadena. Como se observa en la fotografía de la Figura A1.1, también podría utilizarse un guante para la muñeca, o una camiseta especial para el sensor del hombro [38].



Figura A1. 1 Colocación de los sensores Xsens en el brazo [25]

Antes de situar cada uno de los sensores, obviamente deben estar encendidos y reconocidos por el software MT Manager, a través de la estación Awinda. Además, es importante tener en cuenta y definir de alguna forma que parte del cuerpo grabará cada sensor, para después saber a qué sección corresponden los datos capturados. También resulta imprescindible ser consciente de los cambios que se van a producir en los ejes X, Y y Z al realizar los movimientos, y cómo estos se verán reflejados más adelante en el esqueleto creado en Blender, ya que, si no se siguen los mismos ejes, el modelo realizará posiciones totalmente diferentes.

Es aconsejable capturar movimientos cortos y guardar varias grabaciones, en lugar de realizar largas capturas, ya que será más complicado localizar posibles errores o derivas.

Anexo II. Comparación formatos TXT y BVH

Una vez se realiza la captura de movimiento de los sensores asociados a las partes del cuerpo establecidas, es necesario tener esta información en un fichero de tipo BVH para poder importarlo en Blender, y de esa forma animar el esqueleto humano.

Sin embargo, al utilizar únicamente el software gratuito MT Manager, en el único formato que se pueden exportar las grabaciones es en TXT.

Esto ha conllevado tener que analizar el contenido de un fichero BVH, identificar las similitudes con los datos que se tienen en el fichero grabado TXT, y volcar esta información para poderlo importar sin problemas.

Así pues, en este anexo se encuentra detallado el contenido del formato BVH (*BioVision Hierarchical data*), el cual guarda los valores tomados durante la captura de movimiento, y cómo se debe completar con el contenido del TXT, para que haga la misma función. Está compuesto por dos partes, la jerarquía y el movimiento.

A2.1 *Hierarchy (Jerarquía)*

La primera parte de este formato define el esqueleto del modelo que se va a animar, describiendo cada uno de los segmentos como la distancia entre dos articulaciones, las categorías a las que pertenecen y sus longitudes [39].

```
HIERARCHY
ROOT [jointName]
{
  OFFSET [float float float]
  CHANNELS [int] [channel types]
  JOINT [jointName]
  {
    OFFSET [float float float]
    CHANNELS [int] [channel types]
    JOINT [jointName]
    {
      OFFSET [float float float]
      CHANNELS [int] [channel types]
      ...
      End Site
      {
        OFFSET [float float float]
      }
    }
  }
  ...
}
```

Figura A2. 1 Estructura de la jerarquía del formato BVH

Como muestra la estructura representada en la Figura A2.1, a partir de la palabra HIERACHY, se define cuál será la articulación raíz (ROOT) y cuáles serán el resto (JOINT). Cada una de ellas debe tener un nombre identificativo. En este caso, de forma resumida, los nombres utilizados siguen la forma de la Figura A2.2 [39]:

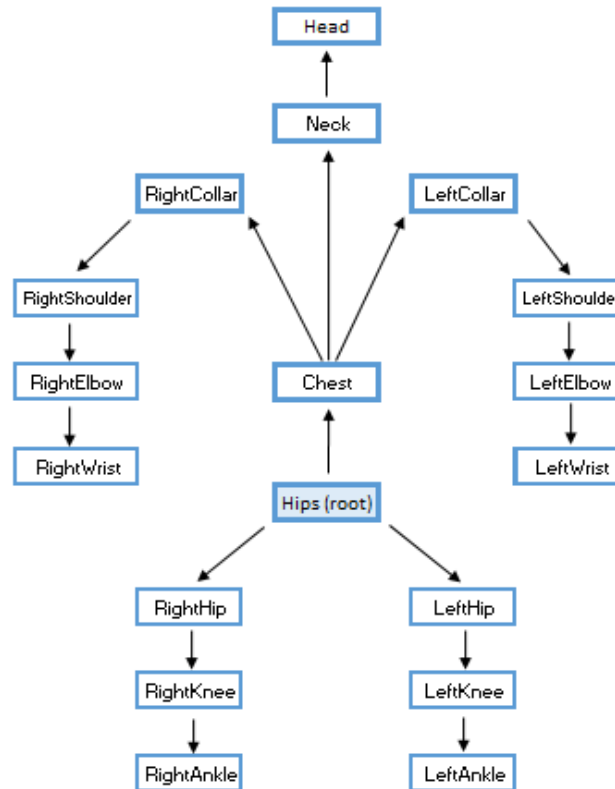


Figura A2. 2 Diagrama resumen de la jerarquía del esqueleto definido en este fichero BVH

Una vez establecidos los nombres de cada segmento, en el interior de las llaves del código se establece la información de estos, dividida en tres secciones [39]:

- **OFFSET:** es un vector que establece la distancia que existe en los ejes X, Y y Z entre una articulación y su padre. De esta forma, para el offset del pecho, la longitud sería entre el pecho y las caderas.
- **CHANNELS:** pueden ser de posición o de rotación, y establecen el tipo de valores que reciben las articulaciones, dependiendo si se mueven por coordenadas (de posición) o por rotaciones (de rotación). De esta forma, en esta línea de código, se indica primero el número de canales y después cuáles son.

La articulación definida como la raíz es la única que tendrá ambos tipos de canales (*Xposition*, *Yposition* y *Zposition*, para la posición, y *Zrotation*, *Xrotation* e *Yrotation* para la rotación).

- **TERMINACIÓN:** establece cómo es el final de la articulación, dependiendo si tiene más articulaciones descendientes, o por el contrario no le siguen más.

Para las que tienen descendencia, el código se vuelve a repetir, escribiendo de nuevo **JOINT** y abriendo llaves con estas tres secciones de información.

Para las que no tienen descendencia, como la cabeza, las manos y los pies, se debe determinar la longitud del segmento con la palabra **END SITE**, apertura de llaves, y la palabra **OFFSET** con la distancia en cada eje.

Finalmente, esta especificación de la forma que va a tener el esqueleto que será animado, se observa en la Figura A2.3, el cual ha sido importado en el software Blender.

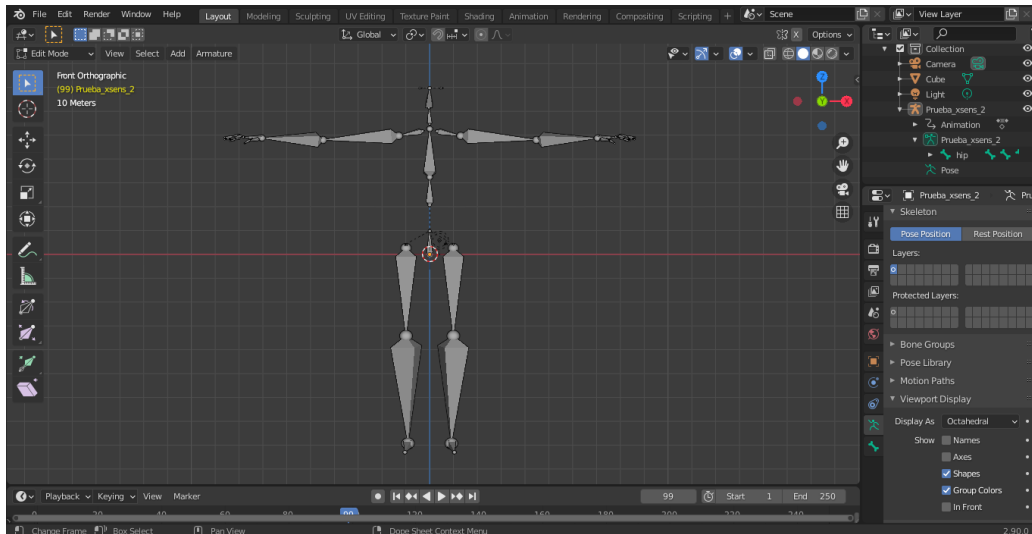


Figura A2. 3 Esqueleto definido en el fichero BVH, importado en Blender

A2.2 Motion (Movimiento)

La segunda parte de este formato define los frames que utiliza la captura, el tiempo de cada frame y los valores grabados que se importan en los canales del apartado anterior.

```
MOTION
Frames: [int]
Frame Time: [float]
[floats for Root's channels] [floats for Root's first son's channels] ...
...
```

Figura A2. 4 Estructura del movimiento del formato BVH

Como muestra la estructura representada en la Figura A2.4, a partir de la palabra MOTION, se indica el número de frames totales que contiene la animación capturada (Frames) y el tiempo de separación entre un frame y otro, expresado en segundos (Frame Time) [39]. Los frames totales de la animación se deberán introducir en el menú de la parte derecha inferior de la Figura A2.3, donde dice *End*, para poder observar la animación completa de principio a fin. De lo contrario, solo se observarán determinados momentos de la captura.

Los datos que utilizará cada canal para moverse vienen a continuación. Siendo cada línea un frame, el orden que siguen por columnas es el que se ha establecido en la primera parte del código, en la jerarquía, de arriba hacia abajo. Las seis primeras columnas de valores pertenecen a la articulación raíz ya que, como se ha detallado, es la única que tiene los dos tipos de canales. Al resto de articulaciones le corresponderán tres columnas de valores a cada una, de las rotaciones roll, pitch y yaw respectivamente (en el orden X, Y, Z) [39].

Para este caso, el formato reducido que siguen los valores grabados (sin contar con las articulaciones *Knee, Ankle, Chest, Collar, Elbow, Wrist*) se muestran en la Figura A2.5 [39].

MOTION																								
Frames: 2																								
Frame Time: 0.0333333																								
Frame 1 →	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	-90	0	0	0	0	0
Frame 2 →	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	-90	0	0	0	0	0
	pX	pY	pZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ	rX	rY	rZ
	Hips			LeftHip			RightHip			Neck			LeftShoulder			RightShoulder			Neck					

Figura A2. 5 Ejemplo de muestra de la parte Motion del esqueleto de la Figura A2.3

En esta, todos los valores son equivalentes a cero, excepto la coordenada X de la articulación que hace referencia al hombro, tanto el derecho como el izquierdo. Esto se debe a que la posición inicial al exportar este archivo en Blender, se trata de un esqueleto humano con los brazos en cruz, formando una T. A partir de aquí, si el resto de valores no fuesen cero, al iniciar la animación, el modelado humano comenzaría a reproducir los movimientos capturados.

A2.3 Fusión TXT y BVH

Como se ha detallado antes, el formato en el cual se graba los movimientos de los sensores es en TXT. En este se almacenan cuatro columnas de datos; el contador de paquetes, y los valores recogidos sobre las rotaciones roll, pitch y yaw, como se muestra en la Figura A2.6.

```
// Start Time: Unknown
// Update Rate: 100.0Hz
// Filter Profile: human (46.1)
// Firmware Version: 4.0.2
PacketCounter SampleTimeFine Roll Pitch Yaw
22489 1.350111 1.271817 130.094254
22490 1.353502 1.271203 130.096101
22491 1.357753 1.271615 130.095336
22492 1.361973 1.269906 130.095252
```

Figura A2. 6 Ejemplo del fichero TXT capturado por los sensores de movimiento

Como para este proyecto se utilizan únicamente tres sensores, se obtendrán tres ficheros TXT, cada uno de ellos con las tres columnas de información que se deben importar en el formato BVH. Para poder volcar estos valores de movimiento en la columna correspondiente de frames del fichero BVH, se debe analizar el código que detalla cada uno de los segmentos, y hallar las articulaciones que hacen referencia al lugar del cuerpo donde se han colocado los tres sensores.

- Para la captura de movimiento del brazo, los sensores se colocarán en el hombro, en el codo y en la muñeca. Estas articulaciones son equivalentes a rShldr, rForeArm y rHand, para la derecha, o lShldr, lForeArm y lHand, en el caso de la izquierda.
- Para la captura de movimiento de la pierna, los sensores se colocarán en la cadera, en la rodilla, y en el tobillo. Estas articulaciones son equivalentes rThigh, rShin y lFoot, para la derecha, o lThigh, lShin y lFoot, en el caso de la izquierda.


```

MT_01200588_005-000_00841DCB: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
// Start Time: Unknown
// Update Rate: 100.0Hz
// Filter Profile: human (46.1)
// Firmware Version: 4.0.2
PacketCounter SampleTimeFine Roll Pitch Yaw
22489 1.329632 1.642245 -56.614501
22490 1.329528 1.644454 -56.612370
22491 1.332457 1.646640 -56.611159
22492 1.33452 1.648915 -56.610016
22493 1.33671 1.6521 1.6521 -56.608829
22494 1.33834 1.652566 1.652566 -56.606011
22495 1.34054 1.65575 1.65575 -56.604825
22496 1.34042 1.657403 1.657403 -56.602104
22497 1.34175 1.660719 1.660719 -56.600985
22498 1.34243 1.662187 1.662187 -56.599908
22499 1.34450 1.664504 1.664504 -56.597936
22500 1.34520 1.665903 1.665903 -56.596913
22501 1.34821 1.668935 1.668935 -56.594778
22502 1.34761 1.672169 1.672169 -56.594682
22503 1.35024 1.6726 1.6726 -56.592675
22504 1.35126 1.676203 1.676203 -56.592406
22505 1.35315 1.677632 1.677632 -56.590423
22506 1.35356 1.679613 1.679613 -56.58937
22507 1.35558 1.681908 1.681908 -56.587344
22508 1.35500 1.68428 1.68428 -56.585481
22509 1.35793 1.688331 1.688331 -56.584251
22510 1.35808 1.68825 1.68825 -56.581428
22511 1.36002 1.689696 1.689696 -56.580325
  
```

Figura A2. 9 Paso 1 Reemplazamiento puntos por comas en fichero TXT

2. Seleccionar todos los valores mediante Edición → Seleccionar todo, copiarlos en una hoja de Excel y eliminar el resto de información que no sean las tres columnas de datos de las rotaciones roll, pitch y yaw, de la forma de la Figura A2.10.

	A	B	C	D	E
1	1,32963	1,642245	-56,614501		
2	1,32953	1,644454	-56,61237		
3	1,33246	1,64664	-56,611159		
4	1,33452	1,648915	-56,610016		
5	1,33671	1,6521	-56,608829		
6	1,33834	1,652566	-56,606011		
7	1,34054	1,65575	-56,604825		
8	1,34042	1,657403	-56,602104		
9	1,34175	1,660719	-56,600985		
10	1,34243	1,662187	-56,599908		
11	1,34450	1,664504	-56,597936		
12	1,34520	1,665903	-56,596913		
13	1,34821	1,668935	-56,594778		
14	1,34761	1,672169	-56,594682		
15	1,35024	1,6726	-56,592675		
16	1,35126	1,676203	-56,592406		
17	1,35315	1,677632	-56,590423		
18	1,35356	1,679613	-56,58937		
19	1,35558	1,681908	-56,587344		
20	1,35500	1,68428	-56,585481		
21	1,35793	1,688331	-56,584251		
22	1,35808	1,68825	-56,581428		
23	1,36002	1,689696	-56,580325		

Figura A2. 10 Paso 2 Resultado de copiar los valores TXT en una hoja de Excel

3. Como se puede observar, estos valores están separados por columnas. Sin embargo, se necesita tenerlos en la misma fila, separados por un espacio. Para ello, se selecciona la primera casilla de la columna E, se aplica la fórmula =A1&" "&B1&" "&C1, visible en la Figura A2.11, y se arrastra hacia abajo para atribuir esta operación al resto de filas. De esta forma, quedará similar a la Figura A2.12.

	A	B	C	D	E
1	1,32963	1,642245	-56,614501		1&" "&C1
2	1,32953	1,644454	-56,61237		
3	1,33246	1,64664	-56,611159		

Figura A2. 11 Paso 3 Aplicación fórmula para unir los valores de tres columnas en una, con un espacio de separación

	A	B	C	D	E	F	G
1	1,32963	1,642245	-56,614501		1,329632 1,642245 -56,614501		
2	1,32953	1,644454	-56,61237		1,329528 1,644454 -56,61237		
3	1,33246	1,64664	-56,611159		1,332457 1,64664 -56,611159		
4	1,33452	1,648915	-56,610016		1,334516 1,648915 -56,610016		
5	1,33671	1,6521	-56,608829		1,33671 1,6521 -56,608829		
6	1,33834	1,652566	-56,606011		1,338344 1,652566 -56,606011		
7	1,34054	1,65575	-56,604825		1,340538 1,65575 -56,604825		
8	1,34042	1,657403	-56,602104		1,340421 1,657403 -56,602104		
9	1,34175	1,660719	-56,600985		1,341752 1,660719 -56,600985		
10	1,34243	1,662187	-56,59908		1,342429 1,662187 -56,59908		
11	1,34450	1,664504	-56,597936		1,344495 1,664504 -56,597936		
12	1,34520	1,665903	-56,596913		1,345198 1,665903 -56,596913		
13	1,34821	1,668935	-56,594778		1,348208 1,668935 -56,594778		
14	1,34761	1,672169	-56,594682		1,347611 1,672169 -56,594682		
15	1,35024	1,6726	-56,592675		1,350235 1,6726 -56,592675		
16	1,35126	1,676203	-56,592406		1,351259 1,676203 -56,592406		
17	1,35315	1,677632	-56,590423		1,353147 1,677632 -56,590423		
18	1,35356	1,679613	-56,58937		1,353561 1,679613 -56,58937		
19	1,35558	1,681908	-56,587344		1,355579 1,681908 -56,587344		
20	1,35500	1,68428	-56,585481		1,355004 1,68428 -56,585481		
21	1,35733	1,688331	-56,584251		1,357328 1,688331 -56,584251		
22	1,35808	1,68825	-56,581428		1,358079 1,68825 -56,581428		
23	1,36002	1,689696	-56,580325		1,360015 1,689696 -56,580325		

Figura A2. 12 Paso 3 Resultado de aplicar la fórmula y arrastrar hacia el resto de valores

4. Una vez tenemos los valores del fichero TXT procesados y preparados, se abre el archivo Excel que se adjunta (**VolcadoTxtBvhCEROS.xlsx**). La Hoja 1 está compuesta por siete columnas más una octava de resultados, la cual será la que haya que seleccionar para copiar los valores y volcarlos directamente al fichero BVH (**BaseAnimacionBVH.bvh**).

 - Las columnas primera y quinta, de color rosa, están rellenas por una determinada cantidad de 0. La primera contiene aquellas articulaciones que hacen referencia a las columnas 1-27, y la segunda 37-69. Estos valores se encuentran a cero ya que no se pretenden animar estas articulaciones, y además tampoco se han capturado sus movimientos con ningún sensor.
 - La columna sexta, de color azul, hace referencia a las columnas 70, 71 y 72. En estas se encuentra la información sobre el movimiento del brazo izquierdo, el cual no se pretende animar. Sin embargo, se encuentra definida por los valores (-90 0 0) para establecer que el esqueleto tenga el brazo izquierdo abajo durante toda la animación. Si estos valores fuesen cero también, simplemente el esqueleto comenzaría la animación con los brazos en cruz, formando una T, y mientras moviese el brazo derecho, el izquierdo seguiría inmóvil levantado.
 - Las columnas segunda, tercera y cuarta, de color rojo, amarillo y verde respectivamente, hacen referencia a las articulaciones que se han grabado en este caso en concreto, es decir, el hombro, el codo y la muñeca del brazo derecho.
 - Finalmente, la octava columna, de color morado, contiene la fórmula aplicada para unir los valores del resto de columnas en una misma fila, como se demuestra en la Figura A2.13, con un espacio entre cada número, ya que este será el formato en el que se presente en el fichero BVH.

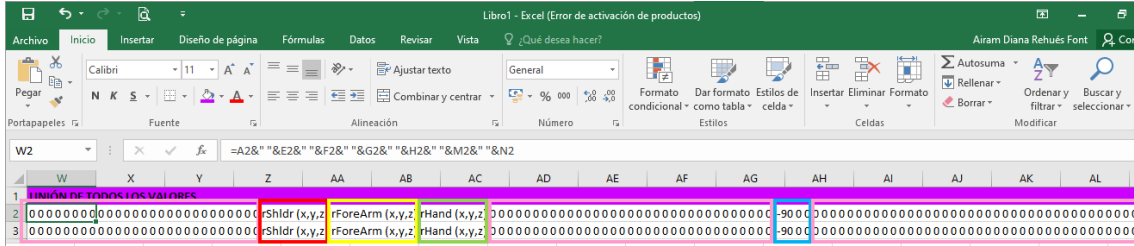


Figura A2. 13 Paso 4 Resultado de la unión de las columnas de valores en el Excel adjuntado

- De esta forma, habiendo entendido todos los campos de los que dispone el archivo Excel adjunto (**VolcadoTxtBvhCEROS.xlsx**), solo queda copiar los valores que se han procesado en el Paso 3 (referentes únicamente a las rotaciones roll, pitch y yaw capturadas por un sensor) en la columna que corresponda roja, amarilla o azul, dependiendo de la parte del cuerpo donde ha sido adherido este sensor.

Para pegar estos datos y no romper la fórmula que se ha aplicado, se deben pegar de forma personalizada, seleccionando el icono señalado en la Figura A2.14.

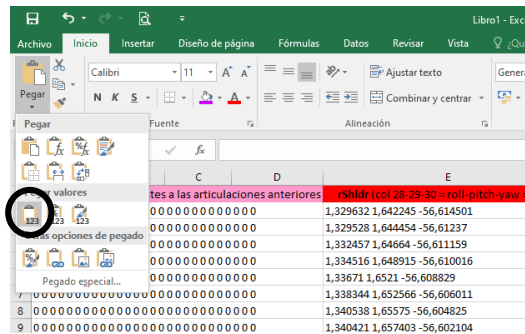


Figura A2. 14 Paso 5 Pegado personalizado de los valores unidos del TXT en el Excel

- Tanto el Paso 3, de procesado de los datos del fichero TXT, como el Paso 5, sobre copia y pega en el archivo Excel adjunto (**VolcadoTxtBvhCEROS.xlsx**), se deben repetir con los tres ficheros TXT que generan cada uno de los sensores, de forma que se obtenga la Hoja 1 rellena, similar a la Figura A2.15.

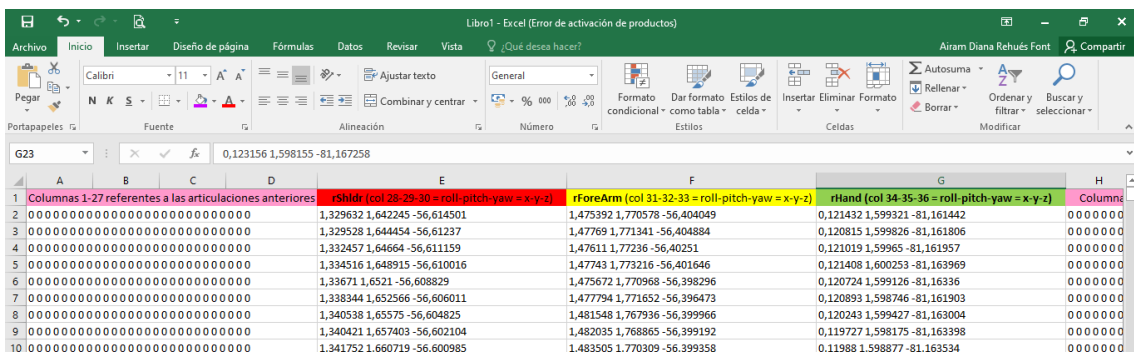


Figura A2. 15 Paso 6 Excel adjunto con valores capturados de los sensores

Anexo III. Importar archivos Xsens en Blender

Una vez se tiene el formato de fichero correcto que el software de animación 3D Blender acepta (siguiendo para este apartado el Anexo II, con la modificación del fichero TXT), se puede proceder a importar la información y observar los resultados.

1. Para ello se debe ejecutar el software Blender, y una vez se ha iniciado, se debe acceder al menú File → Import → Motion Capture (.bvh), como en la Figura A3.1.

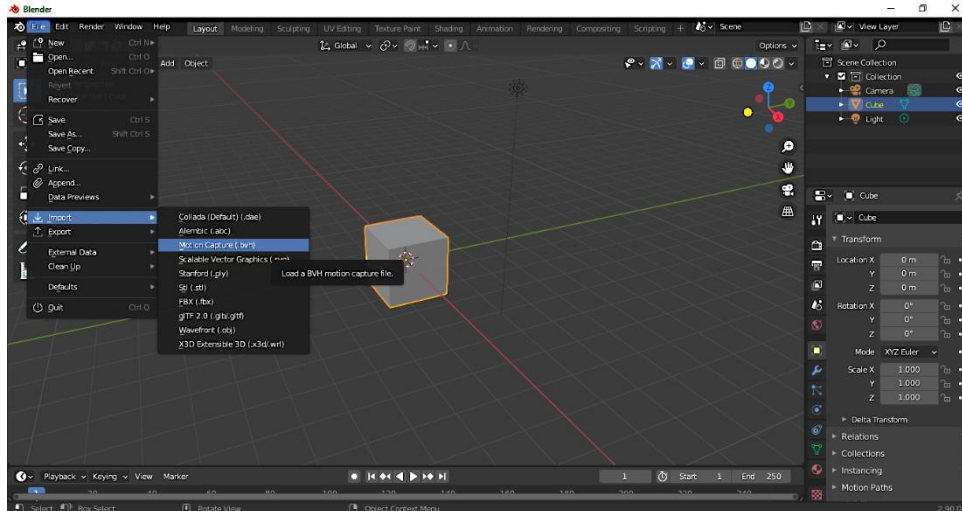


Figura A3. 1 Paso 1 Importar el fichero BVH

2. En la ventana que se despliega se busca la carpeta donde se tiene el fichero, y se selecciona el botón *Import BVH*, visible en la Figura A3.2.

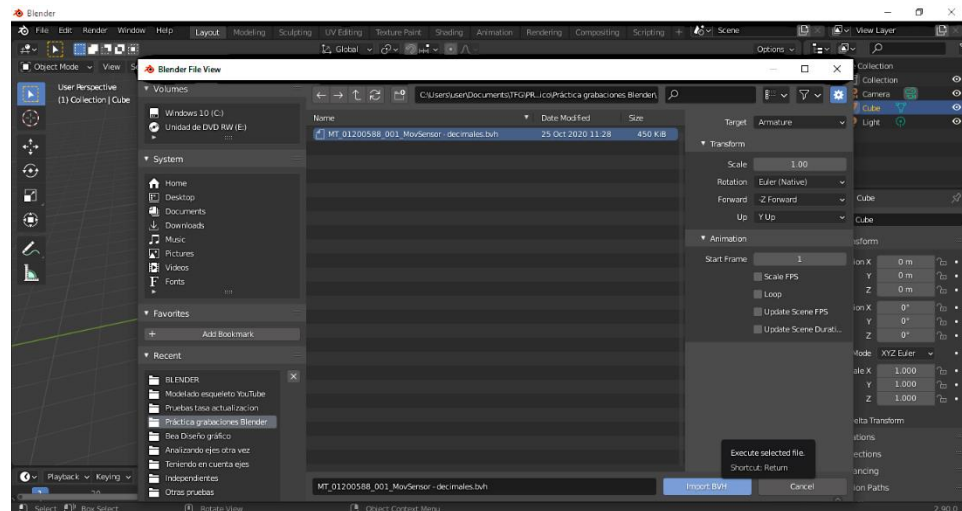


Figura A3. 2 Paso 2 Seleccionar el fichero BVH

- Una vez importado el archivo, mediante el menú de herramientas para la visión del modelo, a la derecha del modelo humano, se puede modificar para su mejor visualización. La ventana que se obtiene se observa en la Figura A3.3.

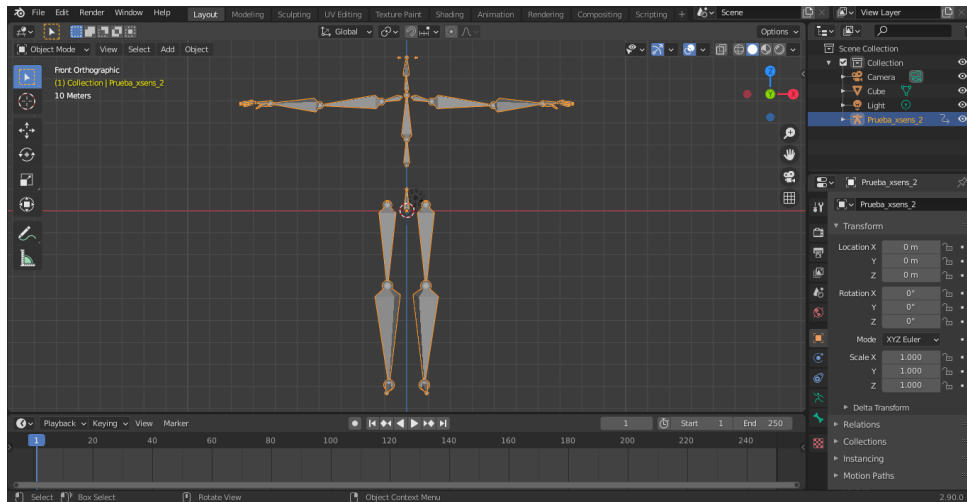


Figura A3. 3 Paso 3 Ventana obtenida al importar el archivo BVH

- En la parte inferior del modelo humano, se encuentra una línea de tiempo con diferentes botones para su reproducción, como se tiene en la Figura A3.4.

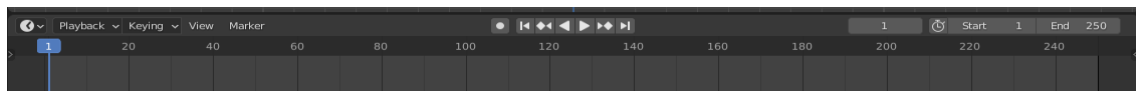


Figura A3. 4 Paso 4 Línea de tiempo y menú de reproducción

Antes de comenzar a reproducir la animación, es importante introducir el número de frames totales que contiene en la casilla de la parte derecha, donde dice *End*. De lo contrario, no se conseguirá observar al completo la grabación. Este dato se obtiene del fichero BVH, en el inicio de la sección de Motion, que a su vez se habrá obtenido de los ficheros TXT generados por MT Manager (el número de frames totales es el número de filas que contiene este fichero, ya que cada fila de valores hace referencia a un frame capturado).

Si se selecciona el botón que hace referencia a *Play*, el esqueleto comenzará a reproducir la animación que se ha grabado durante la captura de movimiento de los sensores, y que más tarde se ha editado para obtenerla en el formato BVH que Blender acepta. Además, para disponer de la animación a la velocidad similar a la grabada, se pueden modificar los fps a los que trabaja Blender mediante el menú de la derecha de la Figura A3.5.

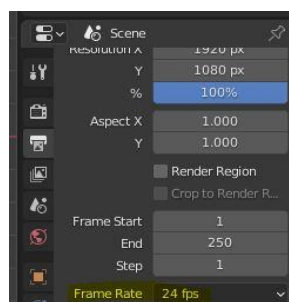


Figura A3. 5 Cambiar fps para la animación en Blender

En la Figura A3.6 se pueden observar las capturas de diferentes frames durante el movimiento del brazo.

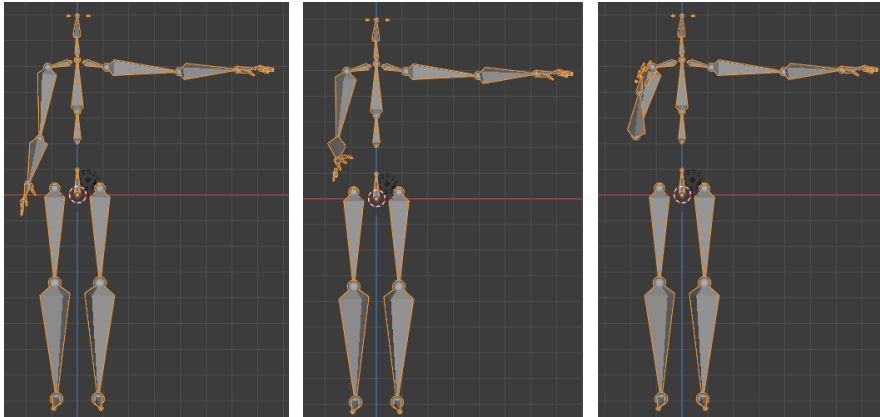


Figura A3. 6 Frames capturados durante la reproducción de la animación capturada con los sensores Xsens

Anexo IV. Modelado humano con esqueleto manual en Blender

Como se ha detallado en el Anexo II, una vez se realiza la captura de movimiento de los sensores asociados a las partes del cuerpo establecidas, es necesario tener esta información en un fichero de tipo BVH para poder importarla en Blender, y de esa forma animar el esqueleto humano.

En el caso de este proyecto, se ha utilizado el proceso del Anexo II, ya que no se disponía de los softwares de licencia de la marca Xsens, los cuales tienen más opciones de formatos para la exportación.

Sin embargo, si no existe este problema de compatibilidad TXT-BVH, se podría diseñar un esqueleto humano en un software como Blender, y animarlo mediante las grabaciones capturadas, siempre en formato compatible con *Motion Capture*.

El software seleccionado para el modelado 3D y la animación de las partes del cuerpo en las que se adhieren los sensores es Blender, el cual se encuentra abierto, con descarga gratis para todos los usuarios. Para acceder a su descarga simplemente se ha de acceder al sitio web www.blender.org, como en la Figura A4.1 y escoger la opción “Download”, en la parte central derecha de la ventana [40].

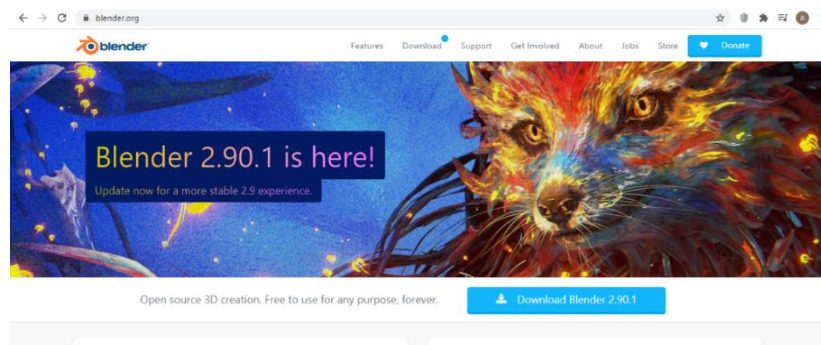


Figura A4. 1 Ventana principal web software Blender

Una vez completado el proceso de descarga e instalación, el cual es similar al de cualquier software, si se ejecuta, se obtiene la pantalla principal capturada en la Figura A4.2 [41].

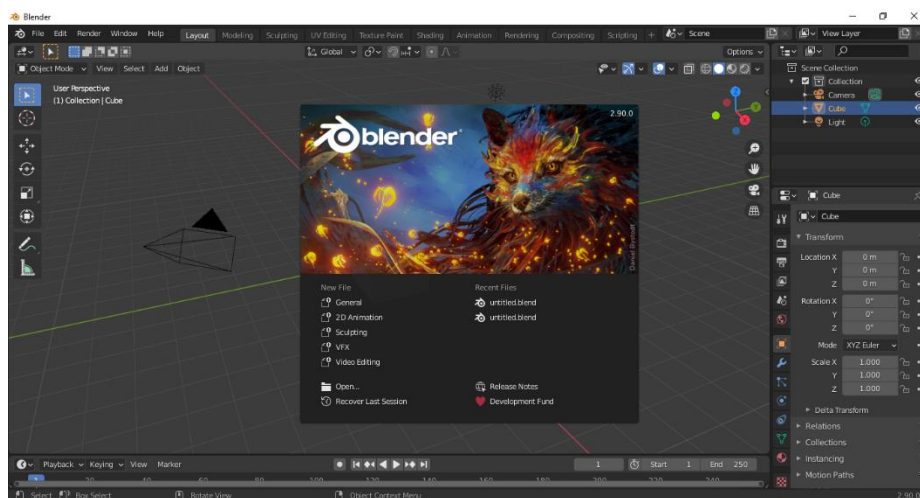


Figura A4. 2 Ventana de inicio Blender

Para poder focalizar este tutorial en el modelado y la creación del esqueleto, teniendo en cuenta las facilidades intuitivas de este software, se presupone una adquisición previa de un uso básico de él. A pesar de ello, si no es el caso, con la guía que sigue, resulta muy sencillo también familiarizarse con el entorno.

A4.1 Modelado humano

Para poder realizar una animación de un cuerpo humano, lo básico es obtener dicho modelo humano. Este se podría configurar con el software Makehuman, ya que se trata de una aplicación de gráficos 3D para llevar a cabo prototipos humanoides similares a la realidad [42].

Sin embargo, para esta ocasión, se ha preferido hacer uso del sitio web www.free3D.com, el cual contiene, entre otros tipos, modelos humanos descargables, la mayoría de ellos gratis [43].

Una vez descargado el modelo seleccionado del enlace de la referencia, observable en la Figura A4.3, se han de seguir los siguientes pasos para disponer de él en Blender [44]:

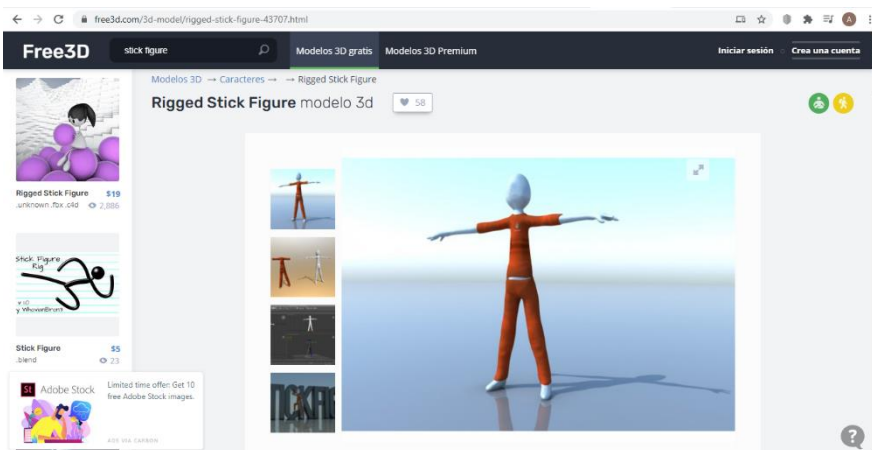


Figura A4. 3 Modelo humano descargado de Free3D

1. Como en la Figura A4.4, File → Import → Wavefront (.obj).

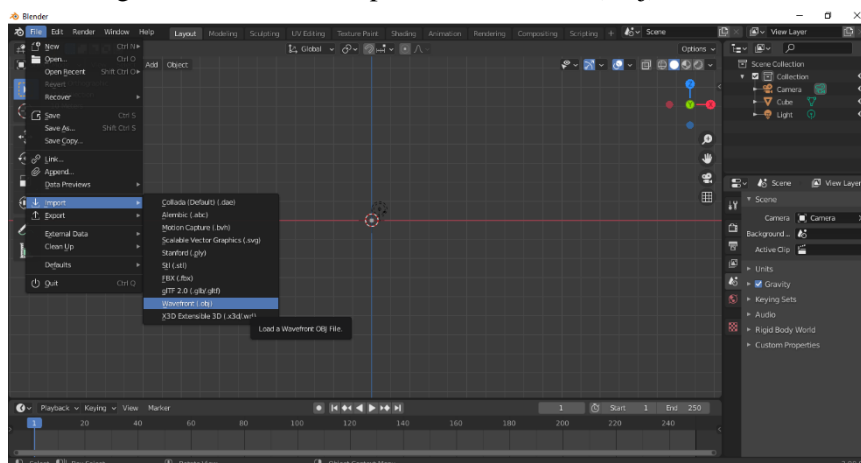


Figura A4. 4 Paso 1 Importar Modelo (.obj)

2. En la ventana que se despliega se busca la carpeta donde se ha descargado, y aunque se dispondrán de diferentes archivos (Figura A4.5), se selecciona únicamente el denominado “StickfigureBODY.OBJ”. De esta forma estaremos eligiendo únicamente lo que

corresponde a la parte del cuerpo, no a la ropa, ya que es más sencillo no tener que animar el textil también.

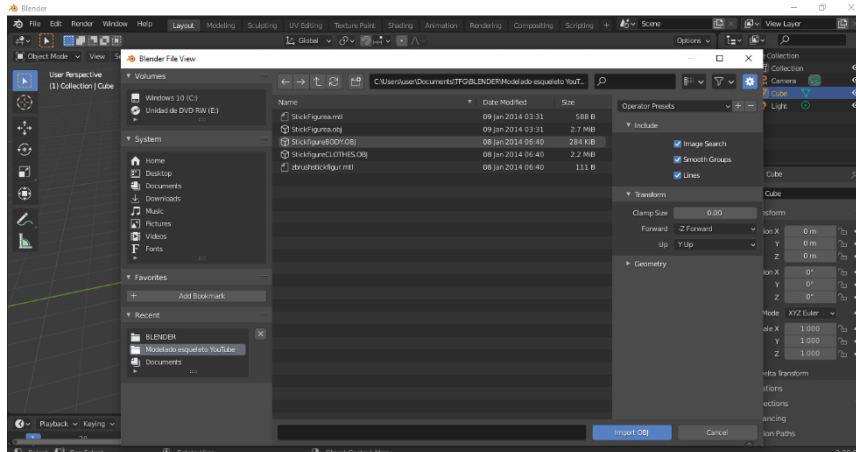


Figura A4. 5 Paso 2 Seleccionar StickfigureBODY.OBJ

3. Una vez se ha importado esta clase de objeto, es importante conocer las herramientas de la Figura A4.6, disponible en la parte superior derecha. Con los ejes X, Y y Z de colores se puede cambiar el punto de vista en el que se observa y se edita el personaje, con la lupa se puede hacer zoom para visualizar con más claridad ciertos detalles, y con la mano se puede mover de lugar el cuerpo.

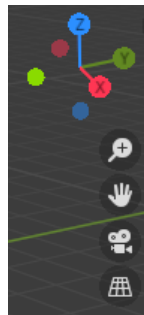


Figura A4. 6 Paso 3 Herramientas para la visión del modelo

A4.2 Añadir armadura

Con el patrón humano colocado a gusto de cada uno, se procede a la creación de un esqueleto que disponga al modelo de unos ejes para poder tener referencias del cuerpo real a la hora de realizar los movimientos [44].

1. Como en la Figura A3.7, Add → Armature.

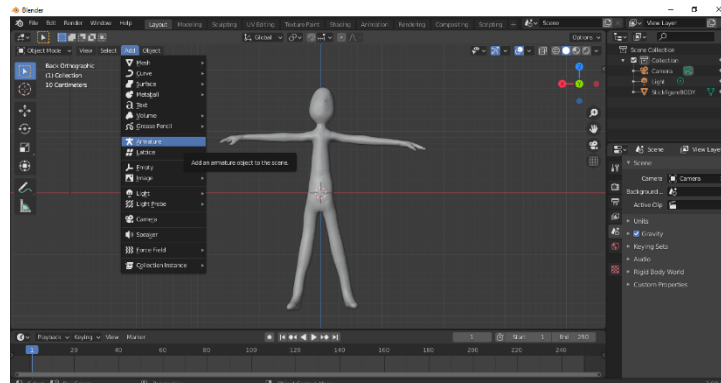


Figura A4. 7 Paso 1 Añadir armadura

2. Si al seleccionar la armadura, no se observa en el interior del cuerpo, se ha de cambiar la opción del menú lateral Viewport Display → Show → In front, Figura A4.8. De esta manera se apreciará sobre el modelo, y no será invisible.

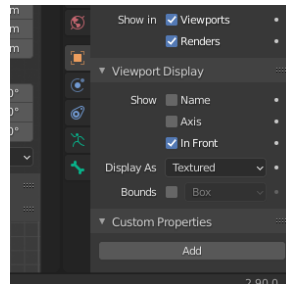


Figura A4. 8 Paso 2 Modo de visualización de la armadura

3. Para la selección y edición de cada uno de los segmentos que se van a ir añadiendo, es importante conocer el menú vertical izquierdo de la Figura A4.9. Cada una de las opciones permite seleccionar el segmento, acceder al cursor, mover, rotar, modificar el tamaño y cambiar de orientación el segmento, en orden de arriba abajo.



Figura A4. 9 Paso 3 Herramientas para la edición de la armadura

4. Haciendo uso de esas herramientas y con paciencia, se puede ir rellenando el modelo seleccionando el nodo del segmento y pulsando la tecla E, de extrudir, *Extrude* en inglés, de la forma que siguen las Figura A4.10 y Figura A4.11.

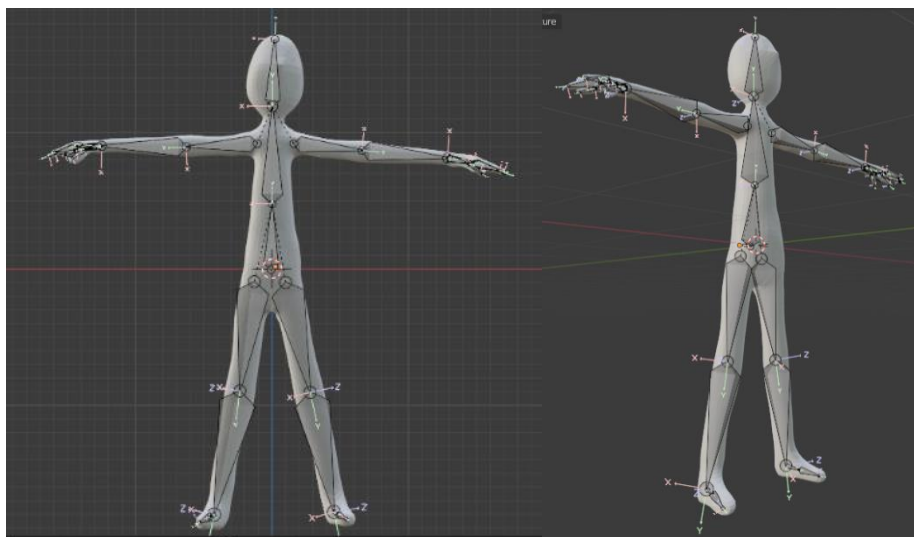


Figura A4. 10 Paso 4 Vista general y lateral armadura

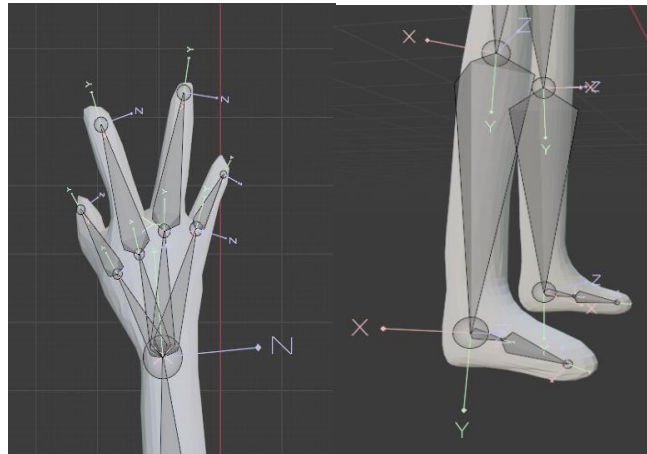


Figura A4. 11 Paso 4 Vista detalle mano y pie armadura

5. Para determinadas secciones, se debe tener en cuenta:
 - 5.1 Al añadir el segmento que hace referencia a la parte superior del tronco, el cual conecta con los hombros y brazos, se debe seleccionar el nodo del segmento, y en el menú *Options*, arriba de los ejes de colores, se activa la opción X-Axis Mirror, como sigue la Figura A4.12. De esta forma, volviendo a seleccionar este nodo y Shift – E, se habilita la opción de añadir dos segmentos que forman un espejo con respecto a ese eje. Estos segmentos están unidos al del tronco, lo que puede ocasionar dificultades al cuadrarlos dentro de la malla del modelo. Por tanto, antes de editarlos, los seleccionamos y Alt – P → Clear Parent, y ya se podrán mover con toda libertad.

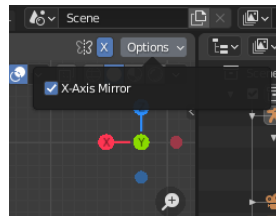


Figura A4. 12 Paso 5 Opción X-Axis Mirror

- 5.2 De igual forma se añaden los segmentos que corresponden a las piernas, y que están unidos al segmento de la parte inferior del tronco.
 - 5.3 Si las extremidades no guardan una relación de simetría, para editar los detalles de los segmentos y que encajen perfectamente dentro del modelo, en todos los puntos de vista, se puede deshabilitar la opción X-Axis Mirror.
6. Para mejorar los movimientos humanos y que sean más reales, en relación con las articulaciones, se selecciona tanto la malla del modelo como la armadura creada con la tecla Shift, click derecho sobre la armadura → Parent → Armature Deform, With Automatic Weights.
 7. Finalmente, mediante el menú File → Save As, se debe guardar el proyecto, para en el siguiente apartado fusionar los movimientos grabados, con el modelo animado.

Anexo V. Animar un modelo específico con captura de movimiento propia

En los Anexos anteriores se ha descrito cómo realizar la captura de movimientos, cómo exportarla en el formato que Blender acepta, para poder observar la animación, y cómo realizar un modelo propio. Así pues, el último manual que queda por detallar es cómo animar un modelo propio que se haya creado, partiendo de una grabación en formato BVH grabada con los sensores inerciales.

Partiendo del fichero procesado de la captura de movimiento del Anexo II, y el modelo que se ha creado en el Anexo IV, se ejecuta Blender y se siguen los siguientes pasos [41]:

1. Importar el modelo humano mediante File → Import → Wavefront (.obj).
2. Importar el fichero de la captura de movimiento mediante File → Import → Motion capture (.bvh).
3. Seleccionar tanto el modelo, como el esqueleto animado, y acceder al menú de la Figura A5.1 para habilitar la casilla de *Names*, observando así el nombre de los segmentos de ambos objetos importados.

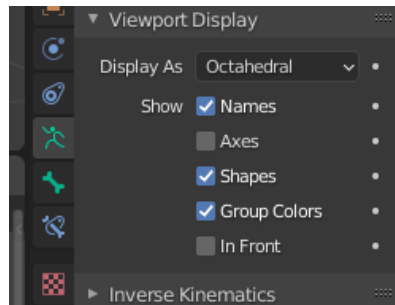


Figura A5. 1 Habilitar la opción Names del menú derecho

4. Seleccionado el modo postura en el menú de la izquierda superior (*Pose mode*), se escoge en primer lugar el segmento del modelo creado que hace referencia al hombro derecho. A través del icono del menú que se observa en la Figura A5.2, se añadirá una restricción al segmento seleccionado. Escogiendo el tipo *Copy rotation*, aparecerá un nuevo menú.

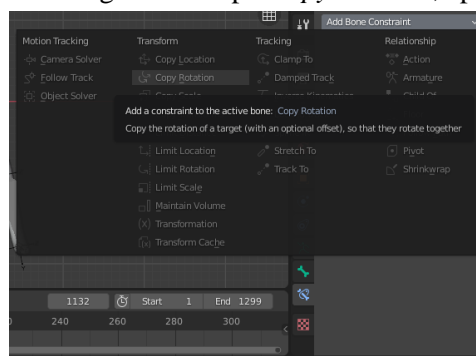


Figura A5. 2 Menú para añadir restricciones a los segmentos

En el primer desplegable denominado *Target* se ha de seleccionar el nombre del fichero donde se tiene la captura de movimiento (es decir, el archivo BVH que se ha grabado y procesado para importarlo en Blender). En el segundo desplegable denominado *Bone* se deberá escoger el segmento de la animación captura del cual queremos copiar el movimiento.

Por ejemplo, si se ha seleccionado el segmento del hombro, en este desplegable se deberá buscar el nombre rShldr.

5. El proceso anterior se debe repetir con todos los segmentos que vayan a participar en la animación. En este caso, se hará con los segmentos rShldr, rForeArm y rHand (si la mano no está compuesta por un único segmento, si no que contiene cuatro falanges que se unen a los dedos, se realiza la misma operación con cada una de las falanges).
6. Una vez añadidas todas las restricciones, al comenzar a reproducir la animación, se observará al modelo creado realizando los mismos movimientos que el esqueleto definido por el archivo BVH, como se muestra en la Figura A5.3.

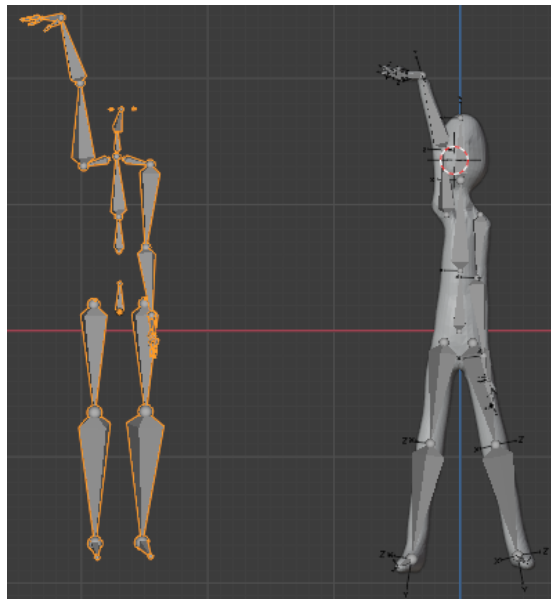


Figura A5.3 Resultado final de animar el modelo propio con una captura específica



Bibliografía

El presente Trabajo de fin de grado contiene citas bibliográficas asignadas a números, los cuales corresponden a las siguientes referencias:

- [1] Seel, Thomas & Raisch, Jörg & Schauer, Thomas. (2014). IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis. *Sensors* (Basel, Switzerland). 14. 6891-909. 10.3390/s140406891.
- [2] Hernández Girbés, G. (2015). EFECTOS VISUALES: Desarrollo y evolución a lo largo de la historia del cine (Doctoral dissertation).
- [3] Ávila, C., & Federico, G. Uso de GPS y acelerómetro para medir performance en deporte de élite.
- [4] Botero, J. S. (2018). Desarrollo de un sistema de medición inercial para obtener y registrar variables biomecánicas en deportistas. *Iatreia*, 31(1-S), S62-S62.
- [5] Izquierdo, M., Martínez-Ramírez, A., Larrión, J. L., Irujo-Espinosa, M., & Gómez, M. (2008, August). Valoración de la capacidad funcional en el ámbito domiciliario y en la clínica: Nuevas posibilidades de aplicación de la acelerometría para la valoración de la marcha, equilibrio y potencia muscular en personas mayores. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 31, No. 2, pp. 159-170).
- [6] Gómez Echeverry, L. L., Jaramillo Henao, A. M., Ruiz Molina, M. A., Velásquez Restrepo, S. M., Páramo Velásquez, C. A., & Silva Bolívar, G. J. (2018). Human motion capture and analysis systems: a systematic review. *Prospectiva*, 16(2), 24-34.
- [7] Filippeschi, A., Schmitz, N., Miezal, M., Bleser, G., Ruffaldi, E., & Stricker, D. (2017). Survey of motion tracking methods based on inertial sensors: A focus on upper limb human motion. *Sensors*, 17(6), 1257.
- [8] Patel, S.; Park, H.; Bonato, P.; Chan, L.; Rodgers, M. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2012, 9, 21.
- [9] Shull, P.B.; Jirattigalachote, W.; Hunt, M.A.; Cutkosky, M.R.; Delp, S.L. Quantified self and human movement: A review on the clinical impact of wearable sensing and feedback for gait analysis and intervention. *Gait Posture* 2014, 40, 11–19.
- [10] Gravina, R.; Alinia, P.; Ghasemzadeh, H.; Fortino, G. Multi-sensor fusion in body sensor networks: State-of-the-art and research challenges. *Inf. Fusion* 2017, 35, 68–80.
- [11] Wong, C.; Zhang, Z.Q.; Lo, B.; Yang, G.Z. Wearable sensing for solid biomechanics: A review. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 2747–2760.
- [12] Iosa, M.; Picerno, P.; Paolucci, S.; Morone, G. Wearable inertial sensors for human movement analysis. *Expert Rev. Med. Devices* 2016, 13, 641–659.
- [13] Harle, R. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2013, 15, 1281–1293.



- [14] Yang, Z.;Wu,C.;Zhou, Z.;Zhang, X.;Wang, X.; Liu, Y. Mobility increases localizability: A survey on wireless indoor localization using inertial sensors. *ACMComput. Surv.*2015, 47, 1–34.
- [15] Yang, S.; Li, Q. Inertial sensor-based methods in walking speed estimation: A systematic review. *Sensors* 2012, 12, 6102–6116.
- [16] Michel, T.; Fourati, H.; Geneves, P.; Layaida, N. A comparative analysis of attitude estimation for pedestrian navigation with smartphones. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Banff, AB, Canada, 13–16 October 2015; pp. 1–10.
- [17] Sabatini, A.M. Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing. *Sensors* 2011, 11, 1489–1525.
- [18] José Luis Ortega (2018). Así se hicieron algunas de las mejores escenas de videojuegos con Motion Capture. *HobbyConsolas*. <https://www.hobbyconsolas.com/reportajes/asi-hicieron-algunas-mejores-escenas-videojuegos-motion-capture-200352>
- [19] Sara Heredia (2016). 10 imágenes de los actores de 'motion-capture' antes de los efectos especiales. *Sensacine*. <http://www.sensacine.com/noticias/cine/noticia-18537142/>
- [20] D. Física Aplicada, TELECOM Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universitat Politècnica de València. Lección 2. Cinemática del sólido (II). MOCAP.https://poliformat.upv.es/access/lessonbuilder/item/7750867/group/GRA_14184_2020/Teoria/2.%20Cinem%C3%A1tica%20II/Apuntes%20%20cinematica%202.pdf
- [21] All3dp. Blender: Rigging – Simply Explained. <https://all3dp.com/2/blender-2-8-rigging-simply-explained/>
- [22] C. Ionescu, F. Li and C. Sminchisescu, Latent structured models for human pose estimation, 2011 International Conference on Computer Vision, Barcelona, 2011, pp. 2220-2227, doi: 10.1109/ICCV.2011.6126500.
- [23] Departamento de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla. Contacto entre sólidos. From Wiki laplace. http://laplace.us.es/wiki/index.php/Contacto_entre_s%C3%B3lidos
- [24] Luinge, H. J., & Veltink, P. H. (2005). Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical and Biological Engineering and computing*, 43(2), 273-282.
- [25] Xsens Technologies B.V., Xsens North America, Inc., MTw Awinda User Manual. Xsens.
- [26] De La Cruz-Oré, J. L. (2013). ¿Qué significan los grados de libertad? *Revista Peruana de Epidemiología*, 17(2), 1-6.
- [27] Pozo Espín, D. F. (2010). Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- [28] Apaza, R., Apaza, J., Dávila, L., Olivares, I., & Pariapaza, J. El Acelerómetro una Puerta a otros Avances Tecnológicos y su Aplicación en la Ingeniería Civil.



- [29] Samuel .A. How to Check Sensors and Hardware on Android and iPhone. From Techlector. <https://techlector.com/how-to-check-sensors-and-hardware-on-android-and-iphone/>
- [30] M. Kok, J. D. Hol, T. B. Schön, F. Gustafsson and H. Luinge, Calibration of a magnetometer in combination with inertial sensors, 2012 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, 2012, pp. 787-793.
- [31] Diebel, J. (2006). Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors. *Matrix*, 58(15-16), 1-35.
- [32] Weisstein, Eric W. Euler Angles. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>
- [33] Morales Tejero, D. (2011). Puesta en marcha del sensor MTi de Xsens (Bachelor's thesis).
- [34] Cyrille Fauvel, Lanh Hong, Cheng Xi Li. Avoid Gimbal Lock for Rotation/Direction Maya Manipulators. From Around the corner. <https://around-the-corner.typepad.com/adn/2012/08/avoid-gimbal-lock-for-rotationdirection-ayamanipulators.html>
- [35] Marins, J. L., Yun, X., Bachmann, E. R., McGhee, R. B., & Zyda, M. J. (2001, October). An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors. In *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180) (Vol. 4, pp. 2003-2011)*. IEEE.
- [36] Echeverry, L. L. G., Henao, A. M. J., Molina, M. A. R., Restrepo, S. M. V., Velásquez, C. A. P., & Bolívar, G. J. S. (2018). Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: una revisión sistemática. *Prospectiva*, 16(2), 24-34.
- [37] Simon, D. (2001). Kalman filtering. *Embedded systems programming*, 14(6), 72-79.
- [38] Luna Serrador, Á. T. (2019). Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para la caracterización de los esfuerzos y movimientos del conductor en la conducción de vehículos automóviles (Doctoral dissertation).
- [39] López Contreras, O. (2012). Motion capture amb Microsoft Kinect (Bachelor's thesis).
- [40] Foundation Blender (2020). Download — Blender.Org. [online] [blender.org. https://www.blender.org/download/](https://www.blender.org/download/)
- [41] Alemán Soler, N. M. (2014). Solución de bajo coste de captura de movimiento basada en Kinect (Bachelor's thesis).
- [42] MakeHuman Community (2020). Open source tool for making 3D characters. <http://www.makehumancommunity.org/>
- [43] Swpws. Rigged Stick Figure Free 3D Model - .3ds .obj .max .fbx - Free3D. (2020). <https://free3d.com/3d-model/rigged-stick-figure-43707.html>
- [44] Piensa 3D - YouTube (14 julio, 2017) CÓMO HACER el RIG (ESQUELETO) de un HUMANO ► BLENDER (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=WGrVeMUKodg>